

**Experimentelle Bestimmung und Darstellung
des Widerstandstensors für Strömungen
durch enge Stabgitter**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der Abteilung für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von
DIETER HOLLENHORST
aus Recklinghausen/Westf.

Bochum 1983



**Experimentelle Bestimmung und Darstellung des Widerstandstensors
für Strömungen durch enge Stabgitter**

Doktorarbeit
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der Abteilung für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von
Dieter Hollenhorst
aus Recklinghausen/Westf.

Bochum 1983

Doktorarbeit eingereicht am : 12. Oktober 1983
Tag der mündlichen Prüfung : 21. November 1983
Referent : Prof. Dr. rer. nat. A. Ziegler
Korreferent : Prof. Dr.-Ing. H. Kremer

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Reaktortechnik im Institut für Energietechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Ziegler, dem Inhaber des Lehrstuhls für Reaktortechnik, danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und für sein konstruktives Interesse.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Kremer gilt mein Dank für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Ferner gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für ihre kooperative Unterstützung.

Bochum, Dezember 1983

Dieter Hollenhorst

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Problem- und Aufgabenstellung
3. Lösungsansatz
4. Auswertung bisheriger Meßergebnisse
5. Bestimmung des Druckfeldes in einem Strömungskanal mit bekanntem Widerstandstensor
6. Strömungsuntersuchungen an Stabgittern mit geänderter Geometrie
 - 6.1. Versuchsaufbau
 - 6.2. Versuchsdurchführung
 - 6.3. Versuchsauswertung
 - 6.3.1. Abhängigkeit der Druckgradienten von der Re-Zahl
 - 6.3.2. Abhängigkeit der Druckgradienten vom Anströmwinkel
 - 6.4. Meßergebnisse
 - 6.4.1. Darstellung der Meßergebnisse
 - 6.4.2. Diskussion der Meßergebnisse - Vergleich mit anderen Autoren
 - 6.4.3. Fehlerabschätzung der Meßergebnisse

7. Zusammenfassung

8. Verzeichnisse

8.1. Bilder-Verzeichnis

8.2. Literatur-Verzeichnis

8.3. Nomenklatur-Verzeichnis

Anhang

Meßwerte

Bilder

1. Einleitung

Der Kern (Core) eines schnellen Brutreaktors besteht aus einer Vielzahl von Brennstäben (Rohren), welche senkrecht im Core stehen und einen Zylinder bilden.

Das Core ist in mehrere Zonen unterteilt, in denen jeweils unterschiedliche Wärmemengen freigesetzt werden. Erfolgt die Kühlung achsparallel mit konstantem Durchsatz und konstanter Eintrittstemperatur, so wird sich am Austritt des Kühlmittels eine Temperaturverteilung entsprechend der abzuführenden Wärmemenge einstellen.

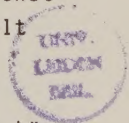
Im Austrittsquerschnitt liegt somit nur dann ein gleichmäßiges Temperaturfeld vor, wenn man den Durchsatz auf die einzelnen Zonen unterschiedlicher Leistungsdichte entsprechend aufteilt, was allerdings zu einer schachtförmigen bzw. kastenförmigen Separation des Cores in Strömungsrichtung führt.

Eine solche Aufteilung hat aber technische und physikalische Nachteile, die in /1/ bzw. in /2/ bereits ausführlich beschrieben worden sind.

Es besteht daher die Aufgabe, in einem offenen d.h. kastenlosen Core eine Strömungsführung zu ermitteln, mit der ein möglichst gleichmäßiges Temperaturprofil im Kühlmittelaustritt erzielt werden kann.

Um den Stromlinienverlauf eines offenen Cores bestimmen zu können, ist es notwendig, die Strömungswiderstände für eine vorgegebene Stabgeometrie zu kennen, bei der die Brennstäbe unter einem bestimmten Winkel zur Stabachse mit verschiedenen Re-Zahlen schräg angeströmt werden.

Dabei liefert das Stabgitter unterschiedliche Strömungswiderstände quer bzw. parallel zur Stabachse. Eine solche Strömung



mit richtungsabhängigem Widerstandsverhalten wird als Strömung mit anisotroper Widerstandscharakteristik bezeichnet und im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch kurz "anisotrope Strömung" bzw. "Strömung mit anisotropem Widerstand" genannt. Die daraus resultierenden Druckgradienten lassen sich nach /1/ mittels einer Diagonalmatrix und einer mittleren Geschwindigkeit des Massentransports darstellen.

Wegen der Abhängigkeit der Matrixelemente vom Anströmwinkel θ läßt sich allerdings die in /1/ benutzte Beschreibungsvorschrift nicht in den Grenzfall einer isotropen Strömung überführen, welche in allen Richtungen jeweils einen konstanten Widerstandsbeiwert aufweisen soll.

Ziel dieser Arbeit ist es, bisher von /1/ gemessene Druckgradienten mit einer sowohl für den isotropen als auch für den anisotropen Fall allgemein gültigen mathematischen Beziehung zu beschreiben, die auch das Verhalten der Strömung physikalisch sinnvoll wiedergeben kann. Darüberhinaus soll aufgrund weiterer Meßergebnisse an Stabgittern mit veränderter Geometrie diese neue Beschreibungsvorschrift für den Druckgradienten überprüft werden.

2. Problem- und Aufgabenstellung

Ein Strömungsfeld mit inkompressiblem Fluid und der Strömungsgeschwindigkeit $\vec{u}$ unterliegt der Kontinuitätsbedingung

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (1)$$

und wird beschrieben durch die Navier-Stokes-Gleichung

$$\operatorname{grad} p_{\text{stat}} = \eta \Delta \vec{u} - \rho \frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{k} \quad (2)$$

Dabei ist $\vec{k}$ der Vektor des Erdschwerefeldes, der sich auch durch das entsprechende Volumenkraft-Potential U bzw. durch die Erdbeschleunigung $\vec{g}$ ausdrücken läßt:

$$\vec{k} = -\rho \operatorname{grad} U = \rho \vec{g} \quad (3)$$

Zwischen dem statischen Druck p_{stat} und dem Gesamtdruck p_{ges} besteht die Beziehung

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{stat}} + \frac{\rho}{2} |\vec{u}|^2 + \rho U \quad (4)$$

Durch Differentiation von (4) ergibt sich über (3)

$$\operatorname{grad} p_{\text{stat}} = \operatorname{grad} p_{\text{ges}} - \rho \operatorname{grad} \left(\frac{|\vec{u}|^2}{2} \right) + \vec{k} \quad (5)$$

Durch Vergleich von (2) und (5) erhält man:

$$\text{grad } p_{\text{ges}} = \eta \Delta \vec{u} + \rho \left[\text{grad} \left(\frac{|\vec{u}|^2}{2} \right) - \frac{d\vec{u}}{dt} \right] \quad (6)$$

Mit Hilfe der Vektoranalysis läßt sich der Klammerausdruck in (6) durch die Rotation und die lokale Beschleunigung der Strömung ersetzen, so daß (6) übergeht in

$$\text{grad } p_{\text{ges}} = \eta \Delta \vec{u} + \rho \left(\vec{u} \times \text{rot } \vec{u} - \frac{\delta \vec{u}}{\delta t} \right) \quad (7)$$

Bei dem hier zu untersuchenden Strömungsproblem wird ein Stabgitter in einer Versuchsanordnung konstanten Querschnitts mit einem zeitlich unabhängigen Massenstrom beaufschlagt. Unter diesen Voraussetzungen liegt eine drehungsfreie ($\text{rot } \vec{u} = 0$) und stationäre Strömung vor ($\delta \vec{u} / \delta t = 0$). Damit würde sich nach (7) der Druckgradient einer solchen Strömung allein aus dem Reibungsterm $\eta \Delta \vec{u}$ ergeben.

Bei einer Stabgitterströmung trägt die Haft- und Gleitreibung an den Staboberflächen wesentlich stärker zum Druckgradienten bei als die Impulsdiffusion zwischen den einzelnen Stromlinien und zur Kanalwand, wodurch die Reibungsverluste infolge der inneren Reibung des Fluids vernachlässigt werden können (/3/).

Im Zusammenhang damit wurde von /1/ in Analogie zum bekannten Druckabfall, der durch einen Form- und Oberflächenwiderstand ζ verursacht wird, ein modifizierter Reibungsterm eingeführt, derart, daß sich der Druckgradient nach (7) darstellen läßt als

$$\text{grad } p_{\text{ges}} = - \frac{\rho}{2} |\vec{u}| \zeta \vec{u} \quad (8)$$

In (8) ist $\underline{\zeta}$ eine Matrix, die den anisotropen Widerstand einer Stabgitterströmung zum Ausdruck bringen soll.

Dieser Widerstandstensor läßt sich als Diagonalmatrix schreiben, wenn das Koordinatensystem die Richtungen quer bzw. parallel zur Stabachse wiedergibt, die den jeweils größten bzw. kleinsten Widerstand des Gitters liefern.

Bezüglich eines solchen Hauptachsensystems hat dann die Matrix folgendes Aussehen

$$\underline{\zeta} = \begin{pmatrix} \zeta_x & 0 \\ 0 & \zeta_y \end{pmatrix} \quad (9)$$

wobei x die Koordinate quer zur Stabachse und y die Koordinate in Richtung der Stabachse sein soll, so daß die Koordinate x der radialen und die Koordinate y der axialen Stabrichtung entspricht.

Mit $u = |\vec{u}|$ ergibt sich aus (8):

$$\text{grad } p_{\text{ges}} = - \frac{\rho}{2} u \{ \zeta_x u_x; \zeta_y u_y \} \quad (10)$$

Falls in (10) die Widerstandsbeiwerte in den beiden unterschiedlichen Richtungen jeweils gleich sind ($\zeta_x = \zeta_y = \zeta$), so läßt sich diese Beziehung dann in die bekannte Gleichung

$$\text{grad } p_{\text{ges}} = - \frac{\rho}{2} \zeta u^2 \quad (11)$$

überführen, die den Druckabfall in einer Strömung mit isotropem Widerstandsverhalten beschreibt.

Die Darstellung des Druckgradienten nach (8) über einen Widerstandstensor $\underline{\zeta}$ - angewandt auf den Vektor $\vec{u}$ - ergibt sich zwangsläufig aus dem richtungsabhängigen (anisotropen) Widerstandsverhalten eines Stabgitters. Dadurch werden Druckgradienten in unterschiedliche Richtungen des Stabgitters über verschiedene Widerstandsbeiwerte ausgedrückt, die im Tensor $\underline{\zeta}$ als Matrixelemente enthalten sind.

Die Multiplikation der auf den Vektor $\vec{u}$ angewandten Matrix mit dem entsprechenden Betrag dieses Vektors läßt sich auch durch die Komponenten von $\vec{u}$ ausdrücken, indem die x-Richtung des Vektors grad p mit u_x und die y-Richtung mit u_y multipliziert wird.

Das hat zur Folge, daß die Matrixelemente in (9) dann auf die entsprechenden Komponenten von $\vec{u}$ bezogen sein müssen:

$$\zeta_x^* = \frac{u}{u_x} \zeta_x = \frac{\zeta_x}{\sin\theta}$$

bzw.

$$\zeta_y^* = \frac{u}{u_y} \zeta_y = \frac{\zeta_y}{\cos\theta}$$

In /1/ wurde festgestellt, daß in einem schräg angeströmten Stabgitter die sich mit dem Anströmwinkel θ ergebende Änderung der Druckgradienten quer bzw. parallel zur Stabachse nicht proportional der Änderung der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente ist. Somit muß speziell bei einer anisotropen Stabgitterströmung eine Winkelabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte d.h. der Matrixelemente in (9) vorliegen:

$$\zeta_x = \zeta_x(\theta) \quad (12a)$$

$$\zeta_y = \zeta_y(\theta) \quad (12b)$$

Mit wachsendem Anstellwinkel θ des Stabgitters gegenüber der Anströmrichtung nehmen nach /1/ beide Widerstandsbeiwerte zu, wobei diese Zunahme nicht linear ist, sondern degressiv für den Widerstand quer zur Stabachse und progressiv für den Widerstand parallel zur Stabachse.

Mit den Widerstandsbeiwerten C_x bei reiner Querströmung ($\theta = 90^\circ$) und C_y bei reiner Längsströmung ($\theta = 0^\circ$) läßt sich dann (12) ausdrücken in der Form

$$\zeta_x = C_x f_x(\theta) \quad (13a)$$

$$\zeta_y = C_y f_y(\theta) \quad (13b)$$

Den Funktionen $f_x(\theta)$ und $f_y(\theta)$ liegt damit die Normierung zu Grunde:

$$f_x(90^\circ) = 1 \quad \text{und} \quad f_y(0^\circ) = 1$$

Man erkennt aus (13), daß sich bei der von /1/ benutzten Darstellung der Widerstandsbeiwerte der Druckgradient einer anisotropen Strömung nach (10) nicht direkt in den Druckabfall einer isotropen Strömung nach (11) überführen läßt: Wegen der in /1/ angegebenen empirischen Winkelabhängigkeit der Matrixelemente in der Form

$$f_x(\theta) = \sin^{0,9}\theta$$

bzw.

$$f_y(\theta) = \cos^{-2}(0,9\theta)$$

läßt sich der Grenzfall der Isotropie ($\zeta_x = \zeta_y$) damit nicht erreichen.

In /2/ wurde festgestellt, daß die Winkelabhängigkeit der Matrixelemente durch eine Wirbeldriftströmung erklärt werden kann, die sich in den Totwassergebieten des Stabgitters schraubenförmig in Richtung der Stabachse bewegt. Diese wirbelbehaftete Teilströmung soll dabei einer wirbelfreien, glatten Strömung überlagert sein und von ihr angetrieben werden.

Es besteht daher die Aufgabe, den Druckgradienten einer Strömung so darzustellen, daß einerseits verschiedene Strömungsanteile zu einer Gesamtströmung zusammengefaßt werden können und daß andererseits die anisotrope Widerstandscharakteristik in den Grenzfall der Isotropie übergehen kann.

Darüberhinaus sollte die neue Beschreibungsform invariant bezüglich der zu untersuchenden Geometrie sein.

3. Lösungsansatz

Die bisherigen Erkenntnisse, daß eine Stabgitterströmung aus wirbelfreien und wirbelbehafteten Anteilen besteht, rechtfertigt einen Lösungsansatz zur Überlagerung der entsprechenden Druckgradienten, wobei die Schreibkonvention $p = p_{\text{ges}}$ getroffen wird:

$$\text{grad } p = (\text{grad } p)_f + (\text{grad } p)_w \quad (14)$$

Bezüglich des stabfesten Koordinatensystems (x,y) läßt sich diese Beziehung in Analogie zu (10) in Komponentenschreibweise darstellen

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} u \left[\{ C_x + F_x(\theta) \} u_x; \{ C_y + F_y(\theta) \} u_y \right] \quad (15)$$

Dabei wird unterstellt, daß die Widerstandsbeiwerte C_x und C_y der Quer- und Längsströmung winkelunabhängig sind und sich die Widerstandsbeiwerte F_x und F_y mit dem Anströmwinkel θ ändern, was vor allem durch die Wirbel driftströmung verursacht wird.

In Ansatz (15) sind die Matrixelemente ζ_x und ζ_y der Diagonalmatrix nach (8) bzw. (9) als Summe der Widerstandsbeiwerte aus freier Strömung und Wirbelströmung dargestellt, wobei für beide Strömungsanteile separate Widerstandsmatrizen in Diagonalf orm vorausgesetzt und jeweils auf denselben Vektor $\vec{u}$ angewandt werden.

Durch die Substitution

$$F_x(\theta) = F_{xy}(\theta) \cot \theta = F_{xy}(\theta) \frac{u_y}{u_x}$$

und

$$F_y(\theta) = F_{yx}(\theta) \tan \theta = F_{yx}(\theta) \frac{u_x}{u_y}$$

ergibt sich aus (15):

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} u \left[\{ C_x u_x + F_{xy}(\theta) u_y \}; \{ C_y u_y + F_{yx}(\theta) u_x \} \right] \quad (16)$$

Diese Form der Darstellung erscheint zweckmäßig, weil bei der Schreibweise in Matrizenform die Winkelabhängigkeit nur in den Matrixelementen der Nebendiagonalen enthalten ist:

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} u \begin{pmatrix} C_x & F_{xy}(\theta) \\ F_{yx}(\theta) & C_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (17)$$

Aus den Funktionen $F_{xy}(\theta)$ und $F_{yx}(\theta)$ lassen sich durch folgenden Ansatz winkelunabhängige Terme herausziehen:

$$F_{xy}(\theta) = C_{xy} f_{xy}(\theta) \quad (18a)$$

$$F_{yx}(\theta) = C_{yx} f_{yx}(\theta) \quad (18b)$$

Zur Spezifikation der Konstanten C_{xy} und C_{yx} in (18) wird auf Gleichung (13) zurückgegriffen:

Aufgrund der Ergebnisse in /1/ ist bei einem schräg angeströmten Stabgitter ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) der Widerstandsbeiwert ζ_x nach (13a) stets kleiner als die Konstante C_x , der Beiwert ζ_y nach (13b) dagegen stets größer als die Konstante C_y .

Das bedeutet, daß bei einer solchen Strömung der Druckabfall quer zur Stabachse betragsmäßig stets kleiner als der Term $(\frac{\rho}{2} u C_x u_x)$ und parallel zur Stabachse stets größer als der Term $(\frac{\rho}{2} u C_y u_y)$ ist.

Demnach muß bei positiv angesetzten Funktionen f in (18) die Konstante C_{xy} , die über (18a) in der Matrix von (17) enthalten ist, negativ und die Konstante C_{yx} in (18b) dagegen positiv sein. Nur dann können mit (17) bzw. (18) gleiche Ergebnisse erzielt werden wie mit den Gleichungen (10) bzw. (13).

Der Lösungsansatz (17) und (18) soll im isotropen Fall, bei dem die Widerstandsbeiwerte C_x , C_y der Quer- und Längsströmung identisch gleich einem Form- und Oberflächenwiderstand ζ sind, die Gleichung (11) erfüllen, so daß im Grenzfall der Isotropie $C_{xy} = C_{yx} = 0$ sein muß, was als Randbedingung in Gleichung (17) bzw. (18) einzuhalten ist.

Das ist möglich, wenn man die Konstanten C_{xy} und C_{yx} proportional zur Differenz der Konstanten C_x und C_y ausdrückt, die im isotropen Fall ineinander übergehen.

$$C_{xy} \approx [C_y - C_x] \quad (19a)$$

$$C_{yx} \approx [C_x - C_y] \quad (19b)$$

Der Proportionalitätsfaktor von (19) kann in die nach (18) winkelabhängigen Funktionen $f(\theta)$ einbezogen werden.

Da der Widerstandsbeiwert bei reiner Queranströmung ($\alpha = 90^\circ$) größer ist als der bei reiner Längsanströmung ($\alpha = 0^\circ$) eines Stabgitters ($C_x > C_y$) wird mit (19) auch der vorher diskutierten Vorzeichenfestlegung der Konstanten Rechnung getragen.

Man erhält durch Einsetzen von (18) und (19) in (17) schließlich den sowohl für den isotropen als auch für den anisotropen Fall gültigen Lösungsansatz, der außerdem noch die Überlagerung von wirbelfreien und wirbelbehafteten Strömungsanteilen charakterisiert:

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} u \begin{pmatrix} C_x & [C_y - C_x] f_{xy}(\alpha) \\ [C_x - C_y] f_{yx}(\alpha) & C_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (20)$$

Diese Gleichung läßt sich auch in allgemeiner Form darstellen:

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} u \underline{\underline{\tau}} \vec{u} = - \frac{\rho}{2} u \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{wobei} \quad \tau_{xx} &= \text{const} \\ \tau_{yy} &= \text{const} \\ \tau_{xy} &= F_{xy}(\alpha) \\ \text{und} \quad \tau_{yx} &= F_{yx}(\alpha) \end{aligned}$$

Gleichungssystem (21)

4. Auswertung bisheriger Meßergebnisse

Es wurde zunächst versucht, vorliegende Meßergebnisse nach /1/ für ein schrägangeströmtes, fluchtendes Stabgitter mit quadratischer Anordnung der einzelnen Stäbe mit möglichst wenig Konstanten in den θ -abhängigen Matrixelementen darzustellen. Dabei wurde die beste Anpassung erzielt, wenn die in (20) aufgeführten, winkelabhängigen Funktionen folgendes Aussehen haben:

$$f_{xy}(\theta) = A_x \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_x + \sin^2\theta} \quad (22a)$$

mit den Konstanten $A_x = 0,84$ und $B_x = 1,08$
bzw.

$$f_{yx}(\theta) = A_y \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_y + \cos^2\theta} \quad (22b)$$

mit den Konstanten $A_y = 0,018$ und $B_y = 0,063$

Die Funktionen in (22) verschwinden für die Grenzfälle der Quer- und Längsanströmung, deren Widerstandsbeiwerte nach /1/ von der mittleren Re-Zahl des Massentransports durch das Stabgitter abhängig sind:

$$C_x = 413 \operatorname{Re}^{-0,14} \frac{1}{m} \quad (23a)$$

bzw.

$$C_y = 3,74 \operatorname{Re}^{-0,063} \frac{1}{m} \quad (23b)$$

In den Bildern 1 - 4 sind die bei den Anströmwinkeln $\theta = 30^\circ$, 45° , 60° und 75° von /1/ gemessenen und mit einer winkelabhängigen Diagonalmatrix beschriebenen Druckgradienten der neuen, modifizierten Darstellungsform im Bereich von $Re \geq 30\,000$ bzw. $Re \leq 210\,000$ gegenübergestellt.

Dabei sind die Druckgradienten dividiert durch den Quotienten aus dem negativen Staudruck ($-\frac{\rho}{2} u^2$) und dem hydraulischen Durchmesser der Stabanordnung (d_h) jeweils in dimensionsloser Form aufgetragen, wobei für ein enges Stabgitter der hydraulische Durchmesser d_h mit dem Stabdurchmesser d nahezu übereinstimmt, was noch später erläutert wird.

Die Bilder 5 - 8 zeigen den Verlauf der dimensionslosen Druckgradienten über den gesamten, extrapolierten Winkelbereich ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$), dargestellt mit demselben Widerstandstensor, wie er für den gemessenen Winkelbereich ($30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$) empirisch gefunden wurde.

Die durch Multiplikation mit dem hydraulischen Durchmesser dimensionslosen Matrixelemente, die sich aufgrund des neuen Lösungsansatzes nach Gleichung (21) mit den Beziehungen (22) und (23) ergeben, sind in den Bildern 9 - 12 für alle möglichen Anströmwinkel θ aufgetragen. Die Konstanten $\zeta_{xx} \cdot d_h$ u. $\zeta_{yy} \cdot d_h$ geben dabei die dimensionslosen Widerstandsbeiwerte $C_x \cdot d_h$ und $C_y \cdot d_h$ bei Quer- und Längsströmung an.

Zur besseren Zuordnung wurde als Koordinatenursprung für die winkelabhängigen Matrixelemente $\zeta_{xy} \cdot d_h$ bzw. $\zeta_{yx} \cdot d_h$ jeweils der Wert $C_x \cdot d_h$ bzw. $C_y \cdot d_h$ gewählt.

Dadurch sind in den Bildern 9 - 12 die winkelabhängigen Matrixelemente, die bei Schräganströmung zum Druckgradienten quer bzw. parallel zur Stabachse beitragen, jeweils um den Betrag der entsprechenden Widerstandsbeiwerte für reine Quer- bzw. Parallelanströmung auf der Ordinate nach oben verschoben.

Zur Berechnung eines Strömungsfeldes mit vorgegebenem Anström-
winkel θ ist es zweckmäßig, die nach (22) winkelabhängigen Ma-
trixelemente durch die entsprechenden Komponenten der mittlere-
ren Geschwindigkeit für den Massentransport auszudrücken, die
sich für eine Strömung in einem mit parallelen Wänden begrenz-
ten Kanal aus Kontinuitätsgründen indirekt bestimmen läßt ge-
genüber einer direkten Messung im Stabgitter selbst:

Das Volumen der vorliegenden Meßstrecke zur strömungstechni-
schen Untersuchung von Stabgittern setzt sich zusammen aus
einem vom Fluid und einem von den Stäben eingenommenen Volu-
menanteil:

$$V_{\text{ges}} = V_F + V_S$$

In einem Stabgitter bilden sich nach den Untersuchungen von /2/
zwei überlagerte Strömungen aus:

Durch die Gassen zwischen den Stäben schlängelt sich eine rela-
tiv glatte und wirbelfreie Strömung, die meßtechnisch z.B. mit
dem Laser-Zwei-Fokus-Verfahren nach /4/ bereits erfaßbar ist.
In den von dieser Strömung ausgesparten Zwischenräumen bildet
sich dagegen eine Wirbelströmung aus, die von der glatten Strö-
mung angetrieben wird und bei Schrägströmung einen zusätzlichen
Massentransport in Richtung der Stabachse bewirkt.

Die mittlere Massenstromdichte setzt sich demnach aus Anteilen
der freien Strömung und der Wirbelströmung zusammen und kann
über entsprechende Volumenanteile durch die Geschwindigkeit der
glatten Strömung und die parallel zur Stabachse gerichtete Wir-
bel driftgeschwindigkeit ausgedrückt werden, die man allerdings
wegen der starken Verwirbelung bisher noch nicht unmittelbar
messen kann.

Diese Verhältnisse lassen es demnach nicht zu, den Massenstrom
in einer schräg angeströmten Stabanordnung direkt zu ermitteln.

Führt man die Strömung jedoch in einem mit parallelen Wänden begrenzten Kanal, so daß der Massenstrom im Ein- und Austrittsquerschnitt des Stabgitters parallel zur Begrenzungswand der Meßanordnung verläuft, liegt damit die Richtung der Geschwindigkeit $\vec{u}$ fest, mit der der mittlere Massentransport innerhalb des Stabgitters erfolgt.

Über die Anströmgeschwindigkeit u_∞ läßt sich aus Kontinuitätsgründen die Massenstromdichte (Durchsatz pro Flächeneinheit) innerhalb des Stabgitters durch die entsprechende Massenstromdichte vor dem Stabgitter ausdrücken:

$$\rho \frac{V_F}{V_{ges}} u = \rho u_\infty \quad (24a)$$

wobei die Anströmgeschwindigkeit u_∞ sich aus dem Querschnitt A_∞ vor der Meßanordnung und dem Volumenstrom $\dot{V}$ ergibt, mit dem das Stabgitter beaufschlagt wird:

$$u_\infty = \dot{V} / A_\infty \quad (24b)$$

Man erhält dann aus den Beziehungen nach (24)

$$u = \frac{V_{ges}}{V_F} \frac{\dot{V}}{A_\infty}$$

wodurch der Vektor $\vec{u}$ auch bzgl. seines Betrages festliegt und für einen bestimmten Volumenstrom $\dot{V}$ jeweils konstant ist. Damit lassen sich die nach (22) winkelabhängigen Funktionen durch die Geschwindigkeitskomponenten $u_x = u \sin \vartheta$ und $u_y = u \cos \vartheta$ ausdrücken und man erhält dann die Gleichung (22) in folgender Form:

$$f_{xy}(\theta) = A_x \frac{u_x u_y}{B_x u^2 + u_x^2} \quad (25a)$$

und

$$f_{yx}(\theta) = A_y \frac{u_x u_y}{B_y u^2 + u_y^2} \quad (25b)$$

Damit hat die Widerstandsmatrix $\underline{\zeta}$ in Gleichung (21) folgendes Aussehen:

$$\underline{\zeta} = \begin{pmatrix} C_x & [C_y - C_x] \frac{u_x u_y}{B_x u^2 + u_x^2} A_x \\ [C_x - C_y] \frac{u_x u_y}{B_y u^2 + u_y^2} A_y & C_y \end{pmatrix}$$

Wegen der Identität der winkelabhängigen Matrixelemente nach (22) und (25) lassen sich die Bilder 1 - 12 auch mit dieser Matrix darstellen. Man erkennt aus den Bildern 1 - 4 speziell bzgl. der Druckgradienten in axialer Richtung, daß die Übereinstimmung mit /1/ im mittleren Bereich der Re-Zahl (90 000, 150 000) besser gegeben ist als im unteren Bereich ($Re = 30\ 000$), was sich in abgeschwächter Form auch für den oberen Bereich ($Re = 210\ 000$) zeigt.

Das liegt daran, daß die Konstanten in (25) bzw. (22) unabhängig von der Re-Zahl ermittelt wurden. Man könnte diese Konstanten auch noch von der Re-Zahl abhängig machen, was aber die Darstellungsform nur komplizierter werden läßt, zumal eine genügend genaue Übereinstimmung auch so gegeben ist.

Aus den Bildern 5 - 8 ist ersichtlich, daß bzgl. der Druckgradienten parallel zur Stabachse im oberen Winkelbereich ($\theta > 75^\circ$) zwischen den beiden Darstellungsformen größere Abweichungen vorhanden sind als bei kleineren Anströmwinkeln.

Hierbei ist zu beachten, daß die oberen Winkelbereiche der Schräganströmung nicht durch Meßwerte erfaßt sind und die neue Darstellungsform nach Gleichung (20) den Ergebnissen des von /1/ gemessenen Winkelbereichs so genau wie möglich angepaßt ist, wodurch die Unterschiede im extrapolierten, d.h. im nicht durch Meßwerte belegten Bereich ohne Bedeutung bleiben.

Dividiert man die in den Bildern 5 - 8 aufgetragenen dimensionslosen Druckgradienten durch den hydraulischen Durchmesser der Stabanordnung ($d_h = 0,02 \text{ m}$), so erhält man den Druckabfall im Stabgitter pro m Längeneinheit jeweils bezogen auf den Betrag des Staudrucks $\rho/2 \cdot u^2$ und damit den Widerstandsbeiwert des Gitters nach /1/ in radialer bzw. in axialer Richtung pro m Längeneinheit in Abhängigkeit von der Re-Zahl (Bild 13 - 16). Multipliziert man diese Widerstandsbeiwerte mit dem jeweiligen Betrag des Staudrucks $\rho/2 \cdot u^2$, so ergibt sich dann der Druckabfall in radialer bzw. axialer Richtung des Stabgitters pro m Längeneinheit.

Allerdings lassen sich die staudruckbezogenen Gradienten nur dann physikalisch sinnvoll als die entsprechenden Widerstandsbeiwerte deuten (Bild 13 - 16), wenn der Widerstandstensor in Form einer Diagonalmatrix wie in /1/ vorliegt, so daß dann sein Matrixelement τ_x in x-Richtung bzw. τ_y in y-Richtung als radialer bzw. axialer Widerstandsbeiwert aufgefaßt werden kann. Bild 13 - 16 soll deshalb lediglich den Vergleich zeigen zwischen den Widerstandsbeiwerten nach /1/ und den entsprechenden, auf den Staudruck bezogenen Gradienten, die sich aus der neuen Darstellungsform ergeben.

5. Bestimmung des Druckfeldes in einem Strömungskanal mit bekanntem Widerstandstensor

Die in einem Gitter mit quadratischer Stabanordnung gemessenen Druckgradienten und die daraus resultierenden Widerstandsbeiwerte erlauben es, das Druckfeld durch Integration der Druckgradienten zu bestimmen und somit die Linien konstanten Druckes in der Stabgitterebene zu ermitteln.

Aus dem Gleichungssystem (21) ergeben sich die Komponenten des Druckgradienten quer und parallel zur Stabachse:

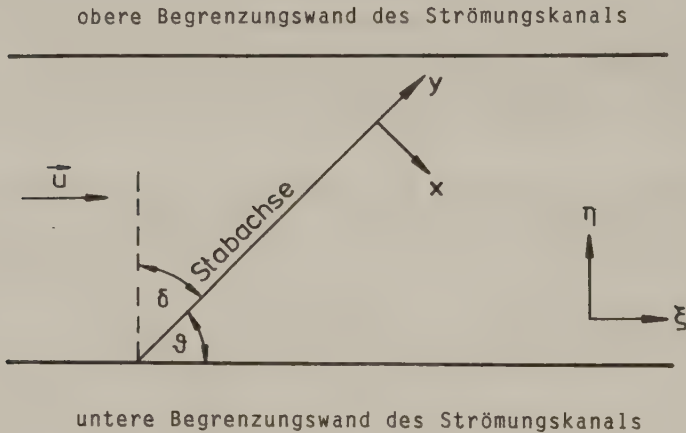
$$\frac{\delta p}{\delta x} = - \frac{\rho}{2} u [\tau_{xx} u_x + \tau_{xy} u_y] \quad (26a)$$

und

$$\frac{\delta p}{\delta y} = - \frac{\rho}{2} u [\tau_{yx} u_x + \tau_{yy} u_y] \quad (26b)$$

Diese beiden partiellen Differentialgleichungen könnten direkt über die jeweiligen Koordinaten integriert werden. Wegen des stabfesten Koordinatensystems (x, y) sind dann aber die Richtungen der Integrationswege vom Anströmwinkel θ abhängig. Deshalb wählt man zweckmäßigerweise ein mit den Begrenzungswänden des Strömungskanals festliegendes Koordinatensystem (ξ, η) , wodurch sich die Integrationswege in Strömungsrichtung (ξ) bzw. quer zur Strömungsrichtung (η) unabhängig vom Winkel θ ergeben.

Das neue, wandfeste Koordinatensystem ergibt sich aus dem ursprünglichen, stabfesten Koordinatensystem durch Drehung um den Winkel $\delta = (90^\circ - \vartheta)$, was die folgende Skizze verdeutlichen soll:



Der Vektor $\text{grad } p$ unterliegt im gedrehten Koordinatensystem der Abbildungsvorschrift:

$$\text{grad } p = \begin{pmatrix} \sin\vartheta & \cos\vartheta \\ -\cos\vartheta & \sin\vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (27)$$

so daß die beiden Komponenten lauten:

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} = \frac{\partial p}{\partial x} \sin\vartheta + \frac{\partial p}{\partial y} \cos\vartheta \quad (28a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = -\frac{\partial p}{\partial x} \cos\vartheta + \frac{\partial p}{\partial y} \sin\vartheta \quad (28b)$$

Durch Einsetzen von (26) in (28) erhält man

$$\frac{\delta p}{\delta \xi} = - \frac{\rho}{2} u [(\tau_{xx} u_x + \tau_{xy} u_y) \sin \theta + (\tau_{yx} u_x + \tau_{yy} u_y) \cos \theta] \quad (29a)$$

$$\frac{\delta p}{\delta \eta} = - \frac{\rho}{2} u [(\tau_{yx} u_x + \tau_{yy} u_y) \sin \theta - (\tau_{xx} u_x + \tau_{xy} u_y) \cos \theta] \quad (29b)$$

Bei einem vorgegebenen Anströmwinkel θ sind damit die Komponenten des Druckgradienten konstant

$$\frac{\delta p}{\delta \xi} = C_1 \quad (30a)$$

$$\frac{\delta p}{\delta \eta} = C_2 \quad (30b)$$

Beachtet man, daß die Variable p sowohl von ξ als auch von η abhängt, d.h. $p = p(\xi, \eta)$, so liefert die Integration von Gleichung (30a) und (30b)

$$p(\xi, \eta) = C_1 \cdot \xi + f_1(\eta) \quad (31a)$$

bzw.

$$p(\xi, \eta) = C_2 \cdot \eta + f_2(\xi) \quad (31b)$$

Zur Bestimmung der Funktionen $f_1(\eta)$ und $f_2(\xi)$ wird Gleichung (31a) nach der Variablen η und Gleichung (31b) nach der Variablen ξ differenziert:

$$\frac{\delta p(\xi, \eta)}{\delta \eta} = \frac{\delta f_1(\eta)}{\delta \eta} \quad (32a)$$

$$\frac{\delta p(\xi, \eta)}{\delta \xi} = \frac{\delta f_2(\xi)}{\delta \xi} \quad (32b)$$

Durch Gleichsetzen von (30a) und (32b) bzw. von (30b) und (32a) erhält man

$$\frac{\delta f_2(\xi)}{\delta \xi} = C_1 \quad (33a)$$

$$\frac{\delta f_1(\eta)}{\delta \eta} = C_2 \quad (33b)$$

Die Integration der Gleichungen (33) liefert:

$$f_2(\xi) = C_1 \cdot \xi + I_1 \quad (34a)$$

und

$$f_1(\eta) = C_2 \cdot \eta + I_2 \quad (34b)$$

wobei I_1 bzw. I_2 jeweils die Integrationskonstante ist.

Durch Einsetzen von (34a) in (31b) bzw. von (34b) in (31a) ergibt sich:

$$p(\xi, \eta) = C_2 \cdot \eta + C_1 \cdot \xi + I_1 \quad (35a)$$

bzw.

$$p(\xi, \eta) = C_1 \cdot \xi + C_2 \cdot \eta + I_2 \quad (35b)$$

Damit sind die Integrationskonstanten identisch ($I_1 = I_2 = I$) und das Gleichungssystem (35) läßt sich zu einer Gleichung zusammenfassen:

$$p(\xi, \eta) = C_1 \cdot \xi + C_2 \cdot \eta + I \quad (36)$$

Setzt man C_1 und C_2 nach (30) in Gleichung (36) ein, und bestimmt die noch freie Integrationskonstante durch den Eintrittsdruck p_0 am unteren Rand der Versuchsanordnung ($\xi = 0, \eta = 0$), so daß $I = p(0,0) = p_0$ ist, dann folgt aus (36):

$$p(\xi, \eta) = p_0 + \frac{\delta p}{\delta \xi} \cdot \xi + \frac{\delta p}{\delta \eta} \cdot \eta \quad (37)$$

Mit den einzelnen Komponenten des Druckgradienten nach (29) läßt sich Gleichung (37) formal ausschreiben:

$$\begin{aligned} p(\xi, \eta) = p_0 - \frac{\rho}{2} u \{ & [(\tau_{xx} u_x + \tau_{xy} u_y) \sin \theta + (\tau_{yx} u_x + \tau_{yy} u_y) \cos \theta] \cdot \xi \\ & + [(\tau_{yx} u_x + \tau_{yy} u_y) \sin \theta - (\tau_{xx} u_x + \tau_{xy} u_y) \cos \theta] \cdot \eta \} \end{aligned} \quad (38)$$

Bezogen auf den Betrag des Staudrucks läßt sich diese Beziehung in dimensionsloser Form darstellen:

$$\frac{p_0 - p(\xi, \eta)}{\frac{\rho}{2} u^2} = [\tau_{xx} \sin^2 \theta + (\tau_{xy} + \tau_{yx}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{yy} \cos^2 \theta] \cdot \xi +$$

$$[\tau_{yx} \sin^2 \theta - (\tau_{xx} - \tau_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} \cos^2 \theta] \cdot \eta$$

(39)

Die Ergebnisse von (39) sind für vorgegebene Anströmwinkel θ und Re-Zahlen in einer plotfähigen Graphik-Datei auf der Meßwerterfassungsanlage des Lehrstuhls gespeichert und können über einen angeschlossenen Graphik-Bildschirm bzw. über einen Tisch- oder Trommelplotter ausgegeben werden.

Die Schnittpunkte der Fläche $p(\xi, \eta)$ mit der Fläche $p = \text{const}$ ergeben die Isobaren $p = \text{const}$.

Die Bilder 17 - 19 zeigen einige Beispiele für die Linien konstanten Drucks im Stabgitter bei verschiedenen Anströmwinkeln und Re-Zahlen.

Man erkennt aus diesen Bildern die anisotrope Widerstandscharakteristik der Stabgitterströmung, indem die Linien $p = \text{const}$ nicht parallel zu den Linien $\xi = \text{const}$ verlaufen. Der Vektor $\text{grad } p$ steht dann nicht mehr senkrecht auf den Linien $\xi = \text{const}$ und hat daher nicht dieselbe Richtung wie der Vektor $\vec{u}$.

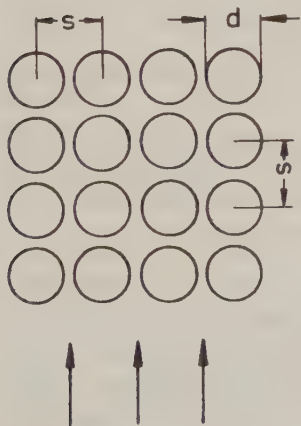
Die Isobaren können auch den gemessenen Druckgradienten entnommen werden ($p = \text{const}$ steht senkrecht auf $\text{grad } p$). Allerdings hat das vorher gezeigte Verfahren den Vorteil, daß die experimentellen Schwankungen ausgeschlossen werden und sich zusätzlich noch das Druckfeld im Stabgitter bestimmen läßt.

6. Strömungsuntersuchungen an Stabgittern mit geänderter Geometrie

Die bisherigen Meßergebnisse von /1/ dienten zunächst als Grundlage zur Verifizierung der neuen Darstellungsform der Druckgradienten in einem schräg angeströmten Stabgitter. Dabei lag eine quadratische, fluchtende Stabanordnung vor mit einem Stabdurchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ und einem Stabmittenabstand von $s = 1,2 d$.

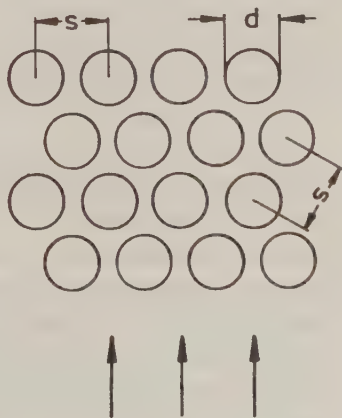
Es besteht die Aufgabe, in einem Stabgitter mit gegenüber /1/ veränderter Geometrie, Druckgradienten zu messen und zu überprüfen, ob sich auch diese Meßwerte mit dem modifizierten Widerstandstensor darstellen lassen, derart, daß lediglich die Konstanten in den Matrixelementen mit anderen Werten belegt werden müssen und die Matrix formal beibehalten wird.

Dazu werden Strömungsuntersuchungen an einem Stabgitter mit dreiecksförmiger Brennstabanordnung durchgeführt, das bei gleichem Stabdurchmesser wie die quadratische Anordnung einen größeren Mittlenabstand aufweist ($s/d = 1,32$), was die nachfolgende Skizze verdeutlicht.



quadratische Gitteranordnung

$$s/d = 1,2$$



Dreiecksanordnung

$$s/d = 1,32$$

Die Gitterstäbe der Dreiecksanordnung werden in einen Meßeinsatz konstanten Querschnitts jeweils unter verschiedenen Winkeln θ eingebaut, der damit dem Anströmwinkel des Stabgitters entspricht.

Dieser Meßeinsatz wird in eine Versuchsstrecke eingesetzt, die in einer Versuchsanordnung mit geschlossenem Wasserkreislauf eingeflanscht ist.

Der Massentransport durch das Stabgitter läßt sich nach (24) durch die Anströmgeschwindigkeit u_∞ beeinflussen. Die für den Durchsatz charakteristische mittlere Re-Zahl wird wie in /1/ definiert durch den Stabdurchmesser d , die mittlere Geschwindigkeit u des Massentransports innerhalb des Stabgitters sowie durch die Zähigkeit des Fluids:

$$Re = \frac{u d}{\nu} = \rho \frac{u d}{\eta} \quad (40)$$

Die obere Grenze der zu erreichenden Re-Zahlen ergibt sich aus den Strömungswiderständen der Rohrleitungen, der Absperr- und Regelarmaturen sowie der Versuchsstrecke selbst. Die untere Grenze ist durch den nur noch sehr geringen Druckabfall innerhalb der Meßstrecke gegeben, da die Meßfehler bei zu niedrigen Geschwindigkeiten unzulässig groß werden.

Der sich daraus ergebende Bereich der Re-Zahl erstreckt sich von $Re = 50\,000$ bis $Re = 125\,000$.

Es werden innerhalb dieser Bandbreite des Massendurchsatzes Meßstrecken mit den Anströmwinkeln von $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ und 75° untersucht.

Kleinere Anstellwinkel des Stabgitters ($\theta < 30^\circ$) lassen es wegen der extremen Rohrlänge im Meßeinsatz nicht zu, eine genügend große Anzahl hintereinander liegender Meßrohre einzusetzen, um den Druckabfall statistisch erfassen zu können. Außerdem müssen bei kleinen Anstellwinkeln Abstandshalter in das Rohrbündel eingesetzt werden, wodurch die Meßwerte beeinflußt

werden und nicht mehr in Relation zum übrigen Winkelbereich zu betrachten sind.

Die Grenzfälle der Quer- und Parallelanströmung ($\vartheta = 90^\circ$ bzw. 0°) werden nicht untersucht, da hierfür Meßwerte aus der Literatur vorliegen. Andererseits lassen sich diese Grenzwerte auch aus dem untersuchten Winkelbereich ($30^\circ \leq \vartheta \leq 75^\circ$) extrapolieren.

6.1. Versuchsaufbau

Die Versuchsanordnung konnte in ihrem grundsätzlichen Aufbau von /1/ übernommen werden.

Sie besteht aus einem geschlossenen Wasserkreislauf mit eingeflanschter Versuchsstrecke, einer Instrumentierung zur Messung von Differenzdruck, Volumenstrom und Temperatur im Zusammenhang mit einer Meßwerterfassungsanlage. Bild 20 zeigt schematisch das Schaltbild des Wasserkreislaufs. Die wesentlichen Bestandteile des Kreislaufs sind eine Kreislaspumpe mit fest angeflanschem Drehstrommotor, die sich zwischen zwei Druckmeßstellen befindet, ein Wärmetauscher, ein Druckkessel als Speicherbehälter mit vorgeschalteter Rückschlagklappe und einer Versuchsstrecke mit Druck-, Temperatur- und Durchflußmessung. Der Kreislauf ist zusammen mit anderen Versuchsständen an ein Wasserreservoir angeschlossen und wird durch motorgetriebene Schieber damit verbunden bzw. davon abgetrennt. Zur Aufrechterhaltung einer konstanten Fluidtemperatur dient ein Wasser/Wasser-Wärmetauscher, dessen sekundärseitiger, regelbarer Durchsatz über eine separate Kühlmittelpumpe aus dem Wasserreservoir bezogen wird.

Die Regelung des Massenstroms durch die Versuchsstrecke erfolgt über motorgetriebene Ventile in Verbindung mit einer Bypassleitung. Zur Feinregelung des Durchsatzes dient ein Regelventil in der Bypassleitung, während zwei Regelorgane vor und hinter dem Druckkessel vorher zur Grobregelung benutzt werden.

Die Hauptabmessungen der Versuchsstrecke haben sich gegenüber /1/ nicht geändert.

Sie besteht aus einem zylindrischen Mittelteil (Nennweite 350 mm) mit Einlaßstutzen für den Meßeinsatz und ist an den Enden jeweils mit einem konischen Übergangsstück zum Einflanschen in den Wasserkreislauf versehen. Bild 21 zeigt eine Ansicht der fertig montierten Versuchsstrecke. Ein Längs- und Querschnitt der Versuchsstrecke mit eingebautem Meßeinsatz ist in Bild 22 dargestellt.

Der Meßeinsatz besteht aus zwei glatten Seitenblechen, die jeweils mit einer Druckausgleichsbohrung versehen sind, und einem Kopf- und Fußblech, in die Bohrungen für den Einsatz der Gitterstäbe eingefräst sind. Abhängig vom Anstellwinkel der Rohre gegenüber dem Kopf- und Fußblech sind diese Bohrungen als Ellipsen mit konstanter kleiner Halbachse bei unterschiedlich dimensionierter großer Halbachse ausgebildet.

Bedingt durch die Druckausgleichsbohrungen in den Seitenwänden ist der Rechteckquerschnitt des Meßeinsatzes mit dem zylindrischen Teil der Versuchsstrecke verbunden, so daß der Zylinder durch entsprechend bemessene Wandstärken den Systemdruck aufnimmt und die nur zur Strömungsführung benötigten Seitenwände des Meßeinsatzes relativ dünn gehalten werden können.

Der Druckausgleich an dem ebenfalls dünnen Kopf- und Fußblech des Einsatzes erfolgt zwangsläufig aufgrund der Passungen für die Durchführung der Gitterstäbe. Durch Abschottungen vor und hinter dem Meßeinsatz (siehe Bild 22) soll ein unzulässig großer Bypassstrom vermieden werden.

Der Aufbau des Meßeinsatzes unterscheidet sich von /1/ durch die veränderte Gitteranordnung:

Im Meßeinsatz sind 7 bzw. 8 Rohrreihen nebeneinander jeweils quer zur Strömungsrichtung versetzt angeordnet, wobei in jeder Reihe mehrere Rohre in Strömungsrichtung fluchtend hintereinander liegen.

Die Anzahl der Rohre pro Reihe ergibt sich in Abhängigkeit vom Anströmwinkel θ durch die vorgegebene Länge des Meßeinsatzes:

Anströmwinkel	:	75 ⁰ , 60 ⁰ , 45 ⁰ , 30 ⁰
Rohre pro Reihe	:	16 , 16 , 14 , 6

Die Bilder 23 - 25 zeigen schematisch die Anordnung des Rohrverbandes bei den verschiedenen Winkeln, wobei die besonders gekennzeichneten Rohre jeweils als Meßrohre ausgebildet sind. Diese Meßrohre dienen zur Bestimmung des Gesamtdrucks p_{ges} und des statischen Drucks p_{stat} im Stabgitter.

Bild 26 soll die Lage der Meßrohre zueinander verdeutlichen. Jedes Meßrohr besitzt über der Rohrlänge verteilt jeweils 6 Meßpunkte. Diese Meßpunkte haben abhängig vom Anströmwinkel θ in Richtung der Stabachse jeweils unterschiedliche Abstände zueinander, wie es Bild 27 für die Winkel 75⁰ und 45⁰ wiedergibt. Die Abstände sind so gewählt, daß - für alle gemessenen Winkel θ - jene Meßsonden, die in Strömungsrichtung hintereinander liegen, parallel zur Begrenzungswand des Meßeinsatzes verlaufen, so daß der senkrechte Abstand dieser Meßstellen zur oberen und zur unteren Wand des Strömungskanals in allen Fällen gleich ist.

Die Meßstellen für den Gesamtdruck sind als Pitot-Sonden ausgebildet. Jedes Meßrohr enthält 2 Einsätze, in denen jeweils 3 übereinanderliegende Pitot-Meßstellen installiert sind. Die Pitot-Sonden bestehen aus dünnen Rohren mit 1 mm Außendurchmesser und 0,15 mm Wandstärke.

Als Meßstellen für den statischen Druck dienen 1 mm große Druckbohrungen, die schräg zur Strömungsrichtung über der Stabachse verteilt und in Strömungsrichtung jeweils 2 mm unterhalb der korrespondierenden Pitot-Meßstelle angeordnet sind, um das Höhen-Niveau - wie bei den Pitot-Sonden - konstant zu halten.

Durch die höhenversetzte Anordnung der Meßstellen für Gesamtdruck und statischen Druck soll eine gegenseitige Beeinflussung vermieden werden.

Die gemessenen Drücke werden durch dünne Schläuche innerhalb der Meßstäbe weitergeleitet und durch das obere Ende der Stäbe aus dem Meßeinsatz herausgeführt, so daß die Strömung dadurch nicht gestört wird. Die Meßschläuche werden über Schlauchdurchführungen zu außerhalb der Versuchsstrecke angeordneten Differenzdruckaufnehmern geleitet. Diese Druckaufnehmer arbeiten als induktive Meßwertaufnehmer und sind von /1/ übernommen worden. Ein Meßstellenumschalter ermöglicht es, einen der fünf installierten Druckaufnehmer mit verschiedenen Meßwerten zu verschiedenen Zeiten zu beaufschlagen. Die dafür vorgesehene Steuerung erfolgt über die auch von /1/ benutzte Vielstellenmeßanlage zur Meßwerterfassung mit angeschlossenem Drucker und Lochstreifenstanzer zur Meßwertausgabe.

Der integrale Druckabfall des gesamten Meßeinsatzes kann über Prandtl-Sonden ermittelt werden, die vor und hinter dem Stabgitter in der Versuchsstrecke installiert sind.

Die Auswertung der Daten erfolgt über die PRIME-Rechenanlage des Lehrstuhls für Reaktortechnik.

6.2. Versuchsdurchführung

Für jeden Anströmwinkel α wird eine Versuchsreihe mit jeweils unterschiedlichen Re-Zahlen gefahren. Damit ergeben sich pro Versuchsreihe in Abhängigkeit vom Massendurchsatz mehrere Meßreihen, die durch die Strömungsgeschwindigkeit in der Zuführungsleitung zur Meßstrecke gekennzeichnet werden, in der ein induktiver Durchflußmesser integriert ist. So bedeutet z.B. die Kennzahl "5", daß diese Meßreihe mit einer Geschwindigkeit von ca. 5m/s in der Rohrleitung (NW 125) gefahren wird. Analog dazu ist auch jede Versuchsreihe mit einer Kennzahl versehen, die den zu untersuchenden Anströmwinkel charakterisiert:

Versuchsreihenkenzahl :	2	3	4	5
Anströmwinkel :	75°	60°	45°	30°

Demnach bedeutet z.B. die kombinierte Kennzahl 36, daß jener Meßeinsatz, in den das Stabgitter unter einem Einbauwinkel von $\theta = 60^\circ$ installiert ist, mit einem Massendurchsatz beaufschlagt wird, der einer Anströmgeschwindigkeit von 6 m/s in der Meßstrecken-Zuführungsleitung entspricht.

Jede Meßreihe besteht aus jeweils 20 Meßzyklen für die Gesamtdrücke und die statischen Drücke. Pro Meßzyklus werden 52 Meßwerte erfaßt. Davon entfallen 48 Meßsignale auf 8 Meßrohre mit jeweils 6 Meßstellen, 2 Meßwerte auf die Prandtl-Sonden vor und hinter dem Meßeinsatz und jeweils ein Signal auf den integralen Volumenstrom und die Temperatur des Fluids.

Bei der Erfassung der Druckmeßwerte ist zu beachten, daß die Druckaufnehmer nach dem Differenzdruck-Meßverfahren arbeiten, so daß jeweils nur der Druckunterschied zwischen zwei anstehenden Drücken bestimmt werden kann. Deshalb wird jedem an den verschiedenen Meßpunkten im Stabgitter anstehenden Druck ein Referenzdruck gegenübergestellt, der außerhalb des Meßeinsatzes aber innerhalb der Versuchsstrecke abgegriffen wird. Dieser Referenzdruck ist für jede Meßreihe konstant und eliminiert sich bei der Bestimmung der Druckdifferenz zwischen zwei Meßpunkten:

$$p_{\text{Meß}_1} - p_{\text{Meß}_2} = (p_1 - p_{\text{Ref}}) - (p_2 - p_{\text{Ref}}) = p_1 - p_2$$

6.3. Versuchsauswertung

Zur Bestimmung des Druckabfalls zwischen 2 Meßstäben (s. Bild 25) muß die Strömung in dem betreffenden Kanal möglichst frei von Rand- und Einlaufstörungen sein. Daher ist es naheliegend, das entsprechende Geschwindigkeitsprofil über der Kanalhöhe zu erfassen.

Die lokale Geschwindigkeit v an jeder Meßstelle ergibt sich aus den gemessenen Drücken:

$$v = \left[\frac{2 (p_{\text{ges}} - p_{\text{stat}})}{\rho} \right]^{1/2} \quad (41)$$

Damit läßt sich über der Kanalhöhe die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}$ ermitteln. Durch Multiplikation mit dem Kanalquerschnitt ergibt sich im betrachteten Meßkanal der mittlere Volumenstrom.

Bezieht man den Gesamt-Volumenstrom in der Versuchsanordnung auf die Anzahl der im Meßeinsatz vorhandenen Strömungskanäle, so läßt sich ein Vergleich mit dem aus der Messung der Druckdifferenzen ermittelten Volumenstrom durchführen. Bei einer voll ausgebildeten Strömung werden sich beide Werte nur um wenige Prozent voneinander unterscheiden. Wenn dies der Fall ist, können die Meßwerte zur Bestimmung der Druckgradienten herangezogen werden:

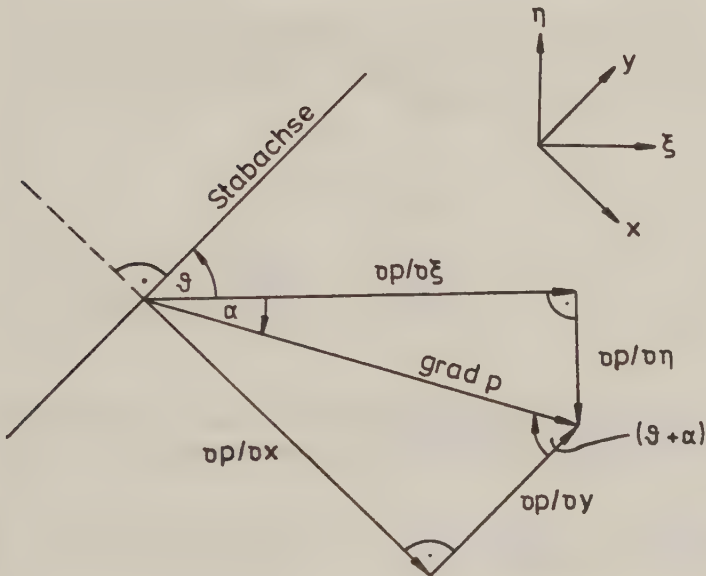
Es werden Meßwerte in Strömungsrichtung (Koordinate ξ), d.h. parallel zur Begrenzungswand des Meßeinsatzes, und in Richtung der Stabachse (Koordinate y) aufgenommen. Damit lassen sich Druckdifferenzen pro Längeneinheit $\Delta p / \Delta \xi$ und $\Delta p / \Delta y$ bestimmen.

Bei linearem Druckabfall, was in einer beruhigten, voll ausgebildeten Stabgitterströmung der Fall ist, läßt sich aus diesen Differenzen auf die entsprechenden Gradienten schließen:

$$|\Delta p / \Delta \xi| = |\delta p / \delta \xi| = |\text{grad } p|_{\xi} \quad (42a)$$

$$|\Delta p / \Delta y| = |\delta p / \delta y| = |\text{grad } p|_y \quad (42b)$$

Bedingt durch die anisotrope Widerstandscharakteristik des Stabgitters gibt es zwischen dem Vektor $\text{grad } p$ und der Strömungsrichtung ξ einen Winkel, der hier wie in /1/ mit α bezeichnet wird, was folgende Skizze verdeutlichen soll:



Aus dieser Skizze ergibt sich aus trigonometrischen Gründen:

$$|\delta p / \delta \xi| = |\text{grad } p| \cos \alpha \quad (43a)$$

und

$$|\delta p / \delta y| = |\text{grad } p| \cos (\theta + \alpha) \quad (43b)$$

Aus diesen beiden Beziehungen läßt sich der Winkel α zwischen Druckgradient und Strömungsrichtung bestimmen:

$$\tan \alpha = \cot \theta - \frac{|\delta p / \delta y|}{|\delta p / \delta \xi|} \frac{1}{\sin \theta} \quad (44)$$

Mit bekanntem Winkel α läßt sich dann der Druckgradient quer zur Stabachse ($\delta p / \delta x$) und mit $\delta p / \delta y$ auch der Betrag des Druckgradienten $|\text{grad } p|$ berechnen:

$$\delta p / \delta x = (\delta p / \delta y) \tan (\theta + \alpha) \quad (45)$$

$$|\text{grad } p| = [(\delta p / \delta x)^2 + (\delta p / \delta y)^2]^{1/2} = \frac{|\delta p / \delta \xi|}{\cos \alpha} \quad (46)$$

Der Druckgradient quer zur Strömungsrichtung (Koordinaten) ergibt sich aus den geometrischen Zusammenhängen:

$$|\delta p / \delta n| = |\text{grad } p| \sin \alpha = |\delta p / \delta \xi| \tan \alpha \quad (47)$$

6.3.1 Abhängigkeit der Druckgradienten von der Re-Zahl

Aus der Literatur /5/ ist bekannt, daß die im logarithmischen Maßstab aufgetragenen Widerstandsbeiwerte eines Stabgitters bei reiner Quer- bzw. Parallelanströmung im Fall der hier vorliegenden turbulenten Strömung linear mit der Re-Zahl abfallen, was dann auch für die daraus resultierenden Druckgradienten gilt.

Die bei Schräganströmung des Dreiecksgitters gemessenen Komponenten des Druckgradienten zeigen für jeden untersuchten Anströmwinkel θ ebenfalls einen nahezu linearen Abfall mit steigender Re-Zahl, so daß sich für einen bestimmten Winkel θ mit $Re_1 > Re_2$ der Ansatz machen läßt:

$$\frac{|(\text{grad } p)_x| (Re_1)}{|(\text{grad } p)_x| (Re_2)} = \left(\frac{Re_1}{Re_2} \right)^{\alpha_x} \quad (48a)$$

bzw.

$$\frac{|(\text{grad } p)_y| (Re_1)}{|(\text{grad } p)_y| (Re_2)} = \left(\frac{Re_1}{Re_2} \right)^{\alpha_y} \quad (48b)$$

wobei die Exponenten α_x bzw. α_y jeweils negativ sind, so daß die Druckgradienten mit steigender Re-Zahl fallen.

Aus den Meßergebnissen ergibt sich mit $\alpha_x = - 0,25$ bzw. $\alpha_y = - 0,20$ eine genügend genaue Übereinstimmung mit (48).

Die Bilder 28 und 29 zeigen für alle untersuchten Anströmwinkel die Re-Zahl-Abhängigkeit der radialen und axialen Komponente des Druckgradienten, wobei die Ordinatenwerte jeweils auf den maximalen Betrag des Gradienten normiert sind. In Analogie zu diesen Ergebnissen stehen die Ausführungen von /1/, wo für die Widerstandsbeiwerte und damit auch für die daraus resultierenden Druckgradienten eine qualitativ gleiche exponentielle Abhängigkeit von der Re-Zahl angegeben wird.

Bei der Ermittlung des Widerstandstensors für ein schräg angeströmtes Stabgitter mit Dreiecksanordnung wird die hier gewonnene Re-Zahl-Abhängigkeit der Druckgradienten zunächst nur in den Widerstandsbeiwerten C_x bei reiner Querströmung bzw. C_y bei reiner Parallelströmung erfaßt, die auch in den winkelabhängigen Matrixelementen nach (18) bzw. (19) enthalten sind:

$$C_x = C_{xx} \quad \text{Re}^{x_x} = \text{const}_x \text{Re}^{-0,25} \quad (49a)$$

bzw.

$$C_y = C_{yy} \quad \text{Re}^{y_y} = \text{const}_y \text{Re}^{-0,20} \quad (49b)$$

6.3.2. Abhängigkeit der Druckgradienten vom Anströmwinkel

An dieser Stelle soll untersucht werden, ob sich die Winkelabhängigkeit der Druckgradienten mit einem anisotropen Widerstandstensor darstellen läßt, der - wie es bereits für die Meßergebnisse von /1/ gezeigt werden konnte - diese Abhängigkeit nur in den Elementen der Nebendiagonalen enthält, die im Grenzfall der Isotropie zu Null werden.

Aufgrund des Gleichungssystems (21) müssen dann neben den winkelunabhängigen Matrixelementen C_x bzw. C_y Elemente $\zeta_{xy}(\theta)$ bzw. $\zeta_{yx}(\theta)$ existieren, die im Zusammenhang mit den entsprechenden Komponenten des Geschwindigkeitsvektors $\vec{u}$ die Winkelabhängigkeit der Druckgradienten charakterisieren.

Nach den Beziehungen (20) und (21) soll sich diese Abhängigkeit durch eine Verknüpfung der Widerstandsbeiwerte für Quer- und Längsanströmung mit entsprechenden winkelabhängigen Funktionen zeigen lassen, um insbesondere den Grenzfall der Isotropie zu erfüllen.

Damit lassen sich die Elemente des Widerstandstensors in der Nebendiagonalen wie folgt ausdrücken:

$$\tau_{xy}(\theta) = [C_y - C_x] f_{xy}(\theta) \quad (50a)$$

bzw.

$$\tau_{yx}(\theta) = [C_x - C_y] f_{yx}(\theta) \quad (50b)$$

Mit dieser Gleichung konnte die Winkelabhängigkeit der Ergebnisse nach /1/ beschrieben werden, wenn die darin vorkommenden Funktionen folgendes Aussehen haben:

$$f_{xy}(\theta) = \frac{u_x u_y}{B_x u^2 + u_x^2} A_x = \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_x + \sin^2\theta} A_x$$

bzw.

$$f_{yx}(\theta) = \frac{u_x u_y}{B_y u^2 + u_y^2} A_y = \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_y + \cos^2\theta} A_y$$

Damit wurde - abgesehen von den Re-Zahl-abhängigen Widerstandsbeiwerten für Quer- und Längsströmung - der Verlauf der Druckgradienten über θ lediglich durch jeweils zwei von der Re-Zahl unabhängige Konstanten (A_x , B_x bzw. A_y , B_y) in den entsprechenden Matrixelementen festgelegt:

$$\tau_{xy}(\theta) = [C_y - C_x] A_x \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_x + \sin^2\theta} \quad (51a)$$

bzw.

$$\tau_{yx}(\theta) = [C_x - C_y] A_y \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_y + \cos^2\theta} \quad (51b)$$

Bei der Versuchsauswertung der Meßergebnisse für ein Stabgitter mit gegenüber /1/ geänderter Geometrie wird angestrebt, die Konstanten in Gleichung (51) so zu bestimmen, daß die daraus errechneten Druckgradienten die Meßergebnisse möglichst genau wiedergeben.

Dazu werden mit Hilfe eines Fortran-Rechenprogramms die Druckgradienten für alle untersuchten Anströmwinkel in Abhängigkeit von den frei wählbaren Konstanten A, B aufgestellt. Die Widerstandsbeiwerte C_x und C_y können für den Grenzfall $\theta = 90^\circ$ und $\theta = 0^\circ$ aus der Literatur (/6/, /7/) übernommen werden, wobei die zuvor ermittelte Abhängigkeit von der Re-Zahl zu berücksichtigen ist. Die noch offenen Konstanten (A_x , B_x bzw. A_y , B_y) lassen sich dann so festlegen, daß die Quadratsumme der Abweichungen zwischen den theoretisch und experimentell vorliegenden Druckgradienten möglichst klein wird.

Nach dieser Methode ergeben sich für das im Winkelbereich von $30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ untersuchte Stabgitter folgende Konstanten in den nach Gleichung (51) winkelabhängigen Matrixelementen:

$$A_x = 4,0, B_x = 5,0 \quad ; \quad A_y = 0,038, B_y = 0,056$$

Die entsprechenden Widerstandsbeiwerte für reine Quer- und Parallelanströmung des Stabgitters lauten in der Einheit [1/m]:

$$C_x = 622 \operatorname{Re}^{-0,25} \quad ; \quad C_y = 12 \operatorname{Re}^{-0,20}$$

Dabei liegen die aus den Messungen resultierenden Re-Zahlen im Bereich von $50\,000 \leq \operatorname{Re} \leq 125\,000$.

6.4. Meßergebnisse

Die Versuchsauswertung nach Kapitel 6.3 liefert Meßergebnisse, die für ein Stabgitter mit Dreiecksanordnung in Abhängigkeit von der Re-Zahl und vom Anströmwinkel den Druckgradienten bzw. seine Komponenten wiedergeben.

In einem stabfesten Koordinatensystem (x,y) können die aus den Meßwerten resultierenden Komponenten des Druckgradienten nach Gleichung (26) über die entsprechenden Widerstandsbeiwerte und Strömungsgeschwindigkeiten ausgedrückt werden. Daraus läßt sich nach Gleichung (46) der Betrag des Druckgradienten bestimmen:

$$|\text{grad } p| = \frac{\rho}{2} u \sqrt{(\tau_{xx}u_x + \tau_{xy}u_y)^2 + (\tau_{yx}u_x + \tau_{yy}u_y)^2} \quad (52)$$

Definiert man in (52) einen Wert ζ , derart, daß

$$\zeta \equiv \sqrt{(\tau_{xx}\sin\theta + \tau_{xy}\cos\theta)^2 + (\tau_{yx}\sin\theta + \tau_{yy}\cos\theta)^2}$$

so ergibt sich dann aus (52) der Betrag des Druckgradienten in verkürzter Schreibweise:

$$|\text{grad } p| = \frac{\rho}{2} \zeta u^2 \quad (53a)$$

bzw.

$$\zeta = \frac{|\text{grad } p|}{\frac{\rho}{2} u^2} \quad (53b)$$

Damit ist ζ der auf den Staudruck bezogene Wert des Druckgradienten, der bei Isotropie dem Widerstandsbeiwert entspricht.

Die Meßergebnisse für die Komponenten des Druckgradienten können Aufschluß darüber geben, wie der daraus resultierende Druckgradient des Stabgitters nach (53) zustande kommt:

$$\frac{|(\text{grad } p)_x|}{\frac{\rho}{2} u^2} = \tau_{xx} \sin \theta + \tau_{xy} \cos \theta \quad (54a)$$

bzw.

$$\frac{|(\text{grad } p)_y|}{\frac{\rho}{2} u^2} = \tau_{yx} \sin \theta + \tau_{yy} \cos \theta \quad (54b)$$

Wegen der Anisotropie des Stabgitters ist der Druckgradient nach (53) aber nicht identisch mit dem auf den Staudruck bezogenen integralen Druckabfall zwischen dem Ein- und Austritt der Meßstrecke in Strömungsrichtung. Diesen Wert erhält man, wenn man den Winkel zwischen dem Druckgradienten und der Strömungsrichtung berücksichtigt, so daß Gleichung (53) mit $\cos \alpha$ zu multiplizieren ist, womit sich ein Widerstandsbeiwert ζ_ξ in Strömungsrichtung (ξ -Richtung) ergibt, der damit dem in der Literatur üblicherweise angegebenen Wert entspricht.

$$|(\text{grad } p)_\xi| = |\text{grad } p| \cos \alpha \quad (55a)$$

bzw.

$$\zeta_\xi = \frac{|(\text{grad } p)_\xi|}{\frac{\rho}{2} u^2} = \frac{|\text{grad } p|}{\frac{\rho}{2} u^2} \cos \alpha \quad (55b)$$

Die Abweichung zwischen $|(\text{grad } p)_\xi|$ und $|\text{grad } p|$ wächst mit zunehmendem Winkel α , d.h. mit zunehmender Anisotropie des Stabgitters.

6.4.1. Darstellung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse werden in Abhängigkeit vom Anströmwinkel θ des Stabgitters mit der Re-Zahl als Parameter nach (40) dargestellt.

Die Komponenten des Druckgradienten lassen sich in dimensionsloser Form auftragen, indem sie auf eine Größe N_f der entsprechenden Dimension bezogen werden.

$$|(\text{grad } p)_x|_{N_f} \equiv \frac{|(\text{grad } p)_x|}{N_f}$$

bzw.

$$|(\text{grad } p)_y|_{N_f} \equiv \frac{|(\text{grad } p)_y|}{N_f}$$

Eine geeignete Bezugsgröße N_f läßt sich beispielsweise aus dem hydraulischen Durchmesser der Stabanordnung (d_h) und dem Staudruck ($\frac{\rho}{2} u^2$) bilden:

$$1/N_f = \frac{d_h}{\frac{\rho}{2} u^2}$$

Der hydraulische Durchmesser der Stabanordnung beträgt für den untersuchten Fall der Dreiecksanordnung:

$$d_h = \frac{2\sqrt{3} s^2}{\pi d} - d \quad (56)$$

Mit einem Stabdurchmesser von $d = 0,02 \text{ m}$ und einer Stabteilung von $s = 1,32 d$ ergibt sich aus (56) ein hydraulischer Durchmesser von $d_h = 0,019 \text{ m}$.

Man erkennt, daß sich in einem engen Stabgitter der hydraulische Durchmesser nur unwesentlich (5%) vom Stabdurchmesser unterscheidet, so daß bei der dimensionslosen Darstellung der Meßergebnisse der Stabdurchmesser d anstelle des hydraulischen Durchmessers d_h benutzt wird, wie es auch bei der Definition der Re-Zahl nach (40) in Übereinstimmung mit anderen Autoren (/1/, /2/) der Fall war.

Mit der über den Stabdurchmesser d ausgedrückten Bezugsgröße N_f^* lauten die dimensionslosen Komponenten des Druckgradienten:

$$\frac{|(\text{grad } p)_x|}{N_f^*} = \frac{|(\text{grad } p)_x|}{\frac{\rho}{2} u^2} d \quad (57a)$$

und

$$\frac{|(\text{grad } p)_y|}{N_f^*} = \frac{|(\text{grad } p)_y|}{\frac{\rho}{2} u^2} d \quad (57b)$$

In den Bildern 30 - 33 sind die gemessenen und nach (57) dimensionslosen radialen und axialen Druckgradienten jeweils für verschiedene Re-Zahlen aufgetragen und den theoretisch nach (21) ermittelten Gradienten gegenübergestellt.

Die gekennzeichneten Meßwerte sind jeweils die Mittelwerte einer Meßreihe bestehend aus je 20 Meßzyklen (siehe Kap. 6.2.). Der maximal mögliche Fehler, auf den noch in einer späteren Fehlerbetrachtung eingegangen wird, ist in den Bildern 30a,b als Fehlerbalken eingetragen.

Die aus den Messungen resultierenden, exakten Re-Zahlen liegen im Bereich von 50 000 - 125 000, d.h., es wurden - mit der Re-Zahl als Parameter - Meßwerte ermittelt, die etwa mit $Re = 50\,000$, $75\,000$, $100\,000$ und $125\,000$ korrespondieren. Zwischenwerte werden nur zur Auswertung benutzt (6.3.1.) und wegen der besseren Übersicht nicht dargestellt.

Da es versuchstechnisch nicht möglich war, bei den unterschiedlichen Meßreihen ($30^\circ \leq \vartheta \leq 75^\circ$) jeweils exakt die gleiche mittlere Re-Zahl zu treffen, wurden die gemessenen Druckgradienten über die Re-Abhängigkeit der Widerstandsbeiwerte auf Grund der Gleichungen (48) auf die in den Bildern 30 - 33 aufgeführten Re-Zahlen umgerechnet.

Darüberhinaus ist die Re-Abhängigkeit der Druckgradienten schwach gegenüber der Winkelabhängigkeit, so daß zum Zwecke der direkten Vergleichsmöglichkeit zwischen Messung und Theorie bei verschiedenen Anströmwinkeln eine Umrechnung auf einheitliche Re-Zahlen akzeptiert werden kann.

Die aus den Meßwerten in den Bildern 30 - 33 theoretisch ermittelten Druckgradienten lassen sich auch über den gesamten Winkelbereich ($0^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$) darstellen, wie es den Bildern 34 - 37 zu entnehmen ist.

Die Matrixelemente des Widerstandstensors nach (21) sind - multipliziert mit dem Stabdurchmesser - in dimensionsloser Form in den Bildern 38 - 41 über den gesamten Winkelbereich aufgetragen. Ebenso wie für die Matrixelemente aufgrund der Messungen von /1/ (Bild 9 - 12) sind auch hier aus Gründen der Übersichtlichkeit die winkelabhängigen Matrixelemente um den Betrag der winkelunabhängigen Matrixelemente auf der Ordinate nach oben verschoben.

Für die Praxis ist es zweckmäßig, die Komponenten des Druckgradienten auf den Staudruck zu beziehen, so daß sich damit der Druckabfall pro m Längeneinheit in radialer bzw. axialer Richtung als Vielfaches des Staudrucks ergibt, wie es in den Bildern 42a - 45a aufgetragen ist. Gleichzeitig geben die Bilder 42a - 45a die Gleichungen (54a) und (54b) für verschiedene Re-Zahlen wieder. Dabei stellen die Eckwerte für $\vartheta = 90^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$ die Widerstandsbeiwerte C_x und C_y bei reiner Quer- und Längsströmung dar.

Der jeweils vorliegende Staudruck läßt sich nach (40) auf Grund der Definition der Re-Zahl ermitteln:

$$\frac{\rho}{2} u^2 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Re \cdot v}{d} \right)^2 = \frac{1}{2 \rho} \left(\frac{Re \cdot n}{d} \right)^2$$

Aus dieser Beziehung erhält man für eine bei den Messungen eingehaltene Fluidtemperatur von $27^{\circ}\text{C} \pm 10\%$ einen mittleren Faktor zwischen dem Staudruck und dem Quadrat der Re-Zahl:

$$\frac{\rho}{2} u^2 = 9,2 \cdot 10^{-7} Re^2 \quad [\text{N/m}^2]$$

Multipliziert man damit die Ordinatenwerte aus den Bildern 42a - 45a, so erhält man für die gemessenen Re-Zahlen den Druckverlust des Stabgitters in N/m^2 bezogen auf eine Länge von 1 m in radialer bzw. in axialer Richtung, wie es die Bilder 42b - 45b zeigen.

Aus der Darstellungsform nach Bild 42a - 45a läßt sich der auf den Staudruck bezogene Druckgradient im Stabgitter ableiten:

$$\tau = \frac{\sqrt{(\text{grad } p)_x^2 + (\text{grad } p)_y^2}}{\frac{\rho}{2} u^2} \quad (58a)$$

Gleichung (58a) ist in Bild 46 mit der Re-Zahl als Parameter dargestellt, wobei hier die aus den Meßwerten theoretisch gewonnenen Druckgradienten für den gesamten Winkelbereich ϑ zu Grunde liegen.

Der sich daraus ergebende Verlauf ist jeweils auf den maximalen Wert für reine Querströmung und für die kleinste Re-Zahl des betrachteten Bereichs bezogen, so daß sich aus Bild 46 die normierten dimensionslosen Quotienten ergeben:

$$Q = \frac{\zeta(Re, \vartheta)}{\zeta(50\,000, \frac{\pi}{2})} \quad (58b)$$

Aus den nach (54) ermittelten Druckgradienten läßt sich über Gleichung (45) der Winkel α zwischen Druckgradient und Strömungsrichtung bestimmen:

$$\alpha = \arctan \left[\frac{|(\text{grad } p)_x|}{|(\text{grad } p)_y|} \right] - \vartheta \quad (59)$$

Man erkennt aus Bild 47 für den gemessenen Winkelbereich eine annähernd gute Übereinstimmung des nach (58b) normierten Druckgradienten mit der Funktion $\sin^2 \vartheta$, während der Druckabfall in Strömungsrichtung nach (55a) und damit auch der nach (55b) entsprechende Widerstandsbeiwert in etwa mit $\sin^3 \vartheta$ verläuft. Bild 48 zeigt diese Gegenüberstellung für den gesamten (extrapolierten) Winkelbereich, wobei für die Eckwerte ($\vartheta = 0^\circ, 90^\circ$) der Druckgradient jeweils in Strömungsrichtung zeigt ($\alpha = 0^\circ$). Die Abweichungen bei kleineren Winkeln liegt darin begründet, daß der Druckgradient im Grenzfall ($\vartheta = 0^\circ$) in den Wert für eine reine Parallelströmung übergeht und damit zwangsläufig vom Verlauf der Funktion $\sin^2 \vartheta$ bzw. $\sin^3 \vartheta$ abweichen muß.

Die Erkenntnis, daß sich beide Werte näherungsweise wie $\sin \vartheta$ und nach (55) allerdings auch wie $\cos \alpha$ verhalten, bedeutet, daß die Summe aus den beiden Winkeln nahe bei 90° liegen muß, so daß der nachfolgend mit ϵ bezeichnete Winkel zwischen dem Druckgradienten und seiner radialen Komponente relativ klein ist.

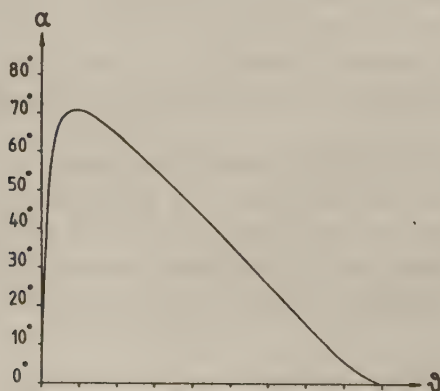
Das liegt darin begründet, daß der radiale Druckgradient betragsmäßig etwa um den Faktor 10 größer ist, als der axiale Druckgradient (siehe Bild 42 - 45) und damit der Druckgradient im gemessenen Winkelbereich nahezu senkrecht zur Stabachse steht. Damit unterscheidet sich, insbesondere in einem engen Stabgitter, der Winkel $(\vartheta + \alpha)$ nur um einen kleinen Winkel ϵ von 90° , wobei α und damit auch ϵ kaum Re -abhängig sind.

$$(\vartheta + \alpha) + \epsilon = 90^\circ \quad (60)$$

Die nachfolgende Tabelle soll über Gleichung (59) den relativ kleinen Winkel ϵ in (60) verdeutlichen:

Anströmwinkel ϑ	30°	45°	60°	75°
Winkel α	56°	41°	26°	10°
$(\vartheta + \alpha)$	86°	86°	86°	85°

Die folgende Skizze zeigt die aus Gleichung (60) resultierende Abhängigkeit von ϑ und α und stimmt qualitativ überein mit den Ergebnissen von /1/, der ebenfalls die Lage des Druckgradienten zum Geschwindigkeitsvektor darstellt.



Die Tatsache, daß der Druckgradient hauptsächlich durch den radialen Anteil geprägt wird, besagt, daß die radiale Komponente dem Verlauf von $\sin^2\theta$ entsprechen muß. Dieser Zusammenhang läßt sich aus den Bildern 42 - 45 entnehmen, die zeigen, daß die radialen Druckgradienten mit zunehmendem Anströmwinkel in etwa mit $\sin^2\theta$ ansteigen, worauf an späterer Stelle dieser Arbeit noch genauer eingegangen wird.

Es erhebt sich an dieser Stelle die Frage, warum eine verhältnismäßig komplizierte Darstellung des Druckgradienten bzw. seiner radialen Komponente in dieser Arbeit eingeführt wird, zumal sich mit $\sin^2\theta$ eine relativ einfache Abhängigkeit vom Anströmwinkel ergibt. Dadurch erscheint es naheliegend, die radiale Komponente des Druckgradienten proportional zu $u_x^2 = u^2 \sin^2\theta$ und zur vollständigen Beschreibung des Druckfeldes die axiale Komponente analog dazu proportional $u_y^2 = u^2 \cos^2\theta$ auszudrücken, um damit insbesondere die Fälle kleiner Anströmwinkel bzw. den Grenzfall der reinen Parallelströmung wiedergeben zu können.

Ein solch einfacher Ansatz führt dann zu einem Widerstandstensor in Form einer Diagonalmatrix mit den konstanten Widerstandsbeiwerten der Quer- und Längsströmung als Elemente der Hauptdiagonalen.

Eine Darstellungsform in dieser einfachen Art ist allerdings aus zwei Gründen nicht zufriedenstellend:

Einerseits kann sie wegen der nicht vorhandenen Winkelabhängigkeit der Matrixelemente die anisotrope Widerstandscharakteristik des Stabgitters nicht exakt wiedergeben. Andererseits ist es mit einer solchen Darstellung nicht möglich - selbst bei einer empirisch zugrunde gelegten Winkelabhängigkeit der Matrixelemente -, den Grenzfall der Isotropie nach (11) zu erfüllen.

Es ist daher zweckmäßig, die in dieser Arbeit vorgestellte Darstellungsform mit winkelabhängigen Widerstandsbeiwerten als Tensorelemente der Nebendiagonalen und konstanten Werten in der Hauptdiagonalen beizubehalten.

Die im Fall der Dreiecksanordnung des Stabgitters empirisch nach (49) und (50) gefundenen Widerstandsbeiwerte führen - eingesetzt in den Widerstandstensor $\underline{\zeta}$ des Gleichungssystems (21) - zu einer Bestimmung des Druckfeldes, wie es bereits in Kapitel 5 mit der darin abschließenden Gleichung (39) für ein Stabgitter mit quadratischer Anordnung gezeigt wurde.

Die in den Bildern 49 - 52 dargestellten Isobaren resultieren aus dem Druckverlauf über ein Stabgitter mit Dreiecksanordnung der einzelnen Gitterstäbe, aufgetragen über der Strömungsebene (ξ, η) in Relation zum Eintrittsdruck $p_0 = p(0,0)$ und normiert auf den Staudruck gemäß Gleichung (39):

$$\frac{p(\xi, \eta) - p_0}{-\frac{\rho}{2} u^2} = f(\zeta_{i,j}, \theta, \xi, \eta) \quad (61)$$

wobei der Index i, j die unterschiedlichen Elemente des Widerstandstensors zum Ausdruck bringen soll. Die Schnittpunkte der nach (61) verlaufenden Ebene mit den Flächen konstanten Drucks liegen dabei auf den Isobaren.

Die Bilder 53 und 54 zeigen die Isobaren für extrem kleine bzw. große Anströmwinkel (1° bzw. 87°), die zwar nicht durch Meßwerte belegt sind, aber auf Druckgradienten basieren, die sich aus dem Meßbereich als Funktion für den gesamten Winkelbereich angeben lassen, wie es bereits in Bild 34 - 37 gezeigt wurde.

Einige der gemessenen Druckgradienten, die dem analytisch ermittelten Druckverlauf nach (61) zu Grunde liegen und senkrecht auf den Linien $p = \text{const}$ stehen, sind maßstabsgerecht in den Bildern 55 - 60 als Vektoren aufgetragen.

Hierbei kommt die anisotrope Widerstandscharakteristik dadurch zum Ausdruck, daß der Gesamtdruckgradient unter dem Winkel α zur Strömungsrichtung geneigt ist, wobei α nahezu unabhängig von der Re-Zahl ist.

6.4.2. Diskussion der Meßergebnisse - Vergleich mit anderen Autoren

Das anisotrope Widerstandsverhalten des Stabgitters wird durch die winkelabhängigen Matrixelemente $\zeta_{xy}(\theta)$ bzw. $\zeta_{yx}(\theta)$ wiedergegeben, welche in radialer bzw. in axialer Richtung den Verlauf des Druckgradienten in Abhängigkeit vom Anströmwinkel des Stabgitters prägen.

Der beim Grenzübergang der Queranströmung ($\theta \rightarrow 90^\circ$) steile Abfall des zum axialen Druckgradienten beitragenden Matrixelementes $\zeta_{yx}(\theta)$ - siehe Bild 38 - 41 - läßt sich dadurch erklären, daß mit steigendem Anstellwinkel der axiale Druckgradient des Stabgitters überproportional zunimmt und im Grenzfall der Queranströmung zwangsläufig auf Null zurückgehen muß.

Hierbei ist zu bemerken, daß für Schräganströmung nur Meßergebnisse bis $\theta_{\max} = 75^\circ$ vorliegen, so daß der Abfall des axialen Druckgradienten oberhalb von etwa $\theta \geq 80^\circ$ nur aus der theoretischen Darstellung der Meßergebnisse resultiert. Daß es allerdings einen qualitativ ähnlichen Abfall des axialen Druckgradienten geben muß, läßt sich mit der guten Übereinstimmung zwischen gemessenen und theoretisch ermittelten Druckgradienten im Bereich $30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ begründen.

Man erkennt in den Bildern 30 - 33, daß speziell bei den axialen Druckgradienten die Abweichung zwischen Messung und Theorie bei den untersuchten Re-Zahlen unterschiedlich groß ist, was auf eine schwache Re-Abhängigkeit der Konstanten A,B in den winkelabhängigen Matrixelementen zurückzuführen ist. Dennoch ist die Abweichung stets kleiner als die Meßgenauigkeit, worauf in einer späteren Fehlerbetrachtung noch eingegangen wird, so daß es nicht sinnvoll ist, eine zusätzliche Re-Abhängigkeit dieser Konstanten einzuführen, was die Darstellung nur unnötig komplizierter werden läßt.

Eine ähnlich schwache Re-Abhängigkeit ist auch aus der entsprechenden Darstellung der Ergebnisse von /1/ ersichtlich (siehe Bild 1 - 4) und kann auch dort aus den oben genannten Gründen vernachlässigt werden.

Die Widerstandsbeiwerte für reine Quer- bzw. Parallelströmung können einerseits als Randbedingungen aus der Literatur entnommen werden und müssen sich andererseits im Rahmen der dort angegebenen Genauigkeit aus den Meßwerten für Schräganströmung ergeben.

Im Fall der Queranströmung ($\vartheta = 90^\circ$) ist darauf zu achten, daß in der Literatur im allgemeinen der entsprechende Widerstandsbeiwert auf die Geschwindigkeit w_e im engsten Spalt des Stabgitters bezogen ist und sich jeweils auf eine Rohrreihe quer zur Strömungsrichtung bezieht.

Zwischen der Geschwindigkeit w_e und der mittleren Geschwindigkeit u des Massentransports nach Gleichung (24) besteht für eine unendlich ausgedehnte Stabanordnung aus Kontinuitätsgründen die Beziehung

$$w_e(s - d) = u_\infty s = \frac{v_F}{v_{ges}} u s \quad (62)$$

Definiert man die "Porosität" des Stabgitters (Volumenanteil des Fluids im Stabgitter) als

$$\gamma \equiv \frac{v_F}{v_{ges}} \quad (63)$$

so ergibt sich damit aus (62)

$$w_e = \frac{s}{s - d} \gamma u \quad (64)$$

Die vorliegende Dreiecksanordnung des Stabgitters hat eine Porosität von

$$\gamma = \frac{s^2 \sin 60^\circ - \frac{\pi}{4} d^2}{s^2 \sin 60^\circ} \quad (65)$$

Bei der untersuchten Gitterteilung von $s/d = 1,32$ erhält man aus (65) einen Anteil von 0,477.

Damit liefert Gleichung (64) die Aussage, daß die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt des Stabgitters etwa doppelt so groß ist wie die mittlere Geschwindigkeit des Massentransports. Die mit diesen Geschwindigkeiten definierten Re-Zahlen unterscheiden sich dann ebenfalls um den Faktor 2.

Bei einer aus den Meßwerten herausgegriffenen Re-Zahl ist die entsprechende Re-Zahl aus der Literatur /6/ damit doppelt so hoch, was bei den Re-Zahl-abhängigen Widerstandsbeiwerten berücksichtigt werden muß.

Aus den Meßwerten für Schrägströmung läßt sich als Grenzwert der Queranströmung ein Widerstandsbeiwert von

$$C_x = 622 \operatorname{Re}^{-0,25} \frac{1}{m} \quad (66)$$

extrapolieren.

Bei einer Re-Zahl von z.B. 10^5 erhält man aus (66)

$$C_x(10^5) = 35 \frac{1}{m} \quad (67)$$

Mit 44 Rohrreihen pro m, die sich bei der untersuchten Gitteranordnung quer zur Strömungsrichtung ergeben würden, erhält man aus (67) einen Widerstandsbeiwert von

$$c_x(10^5) = \frac{0,8}{\text{Rohrreihe}} \quad (68)$$

Der Druckabfall, der aus (68) und der mittleren Geschwindigkeit u gebildet wird, muß mit dem Druckabfall übereinstimmen, der in der Literatur über die Geschwindigkeit w_e und einen korrespondierenden Widerstandsbeiwert ζ_{90° definiert wird:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} 0,8 u^2 = \frac{\rho}{2} \zeta_{90^\circ} w_e^2 = \frac{\rho}{2} \zeta_{90^\circ} 4 u^2 \quad (69)$$

In diesem Beispiel muß die entsprechende Re-Zahl in der Literatur bei $2 \cdot 10^5$ liegen, womit sich aus /6/ Widerstandsbeiwerte zwischen 0,2 und 0,26 pro Rohrreihe ablesen lassen.

Man erkennt, daß der kleinere Wert (0,2) die Gleichung (69) erfüllt, womit sich im Fall der Querströmung eine genügend groÙe Genauigkeit mit anderen Autoren ergibt.

Auch die gemessene Re-Zahl-Abhängigkeit der radialen Widerstände liegt mit $\alpha_x = -0,25$ in der Bandbreite der von anderen Autoren (/6/, /8/) festgestellten Abhängigkeit ($-0,27 \leq \alpha_x \leq -0,17$).

Im Fall der Längsanströmung ist im Stabgitter nur die mittlere Geschwindigkeit als charakteristische Geschwindigkeit bzgl. Druckverlust und Re-Zahl vorhanden. Aus den gemessenen Werten läßt sich in diesem Fall ein Grenzwert von

$$c_y = 12 \operatorname{Re}^{-0,2} \frac{1}{m} \quad (70)$$

extrapolieren.

Aus (70) ergibt sich - als Beispiel analog zur Queranströmung - ein Widerstandsbeiwert von

$$c_y(10^5) = 1,20 \frac{1}{m} \quad (71)$$

Die in /7/ für diese Re-Zahl angegebenen Werte haben einen oberen Grenzwert von

$$\zeta_{00} = 0,022 \frac{1}{d_h} \quad (72)$$

Für eine charakteristische Länge $l = 1 \text{ m}$ und einem hydraulischen Durchmesser von $d_h = 0,019 \text{ m}$ ergibt sich aus (72) ein Widerstandsbeiwert von

$$\zeta_{00} = 1,16 \text{ gegenüber } c_y = 1,20 \text{ aus (71)}$$

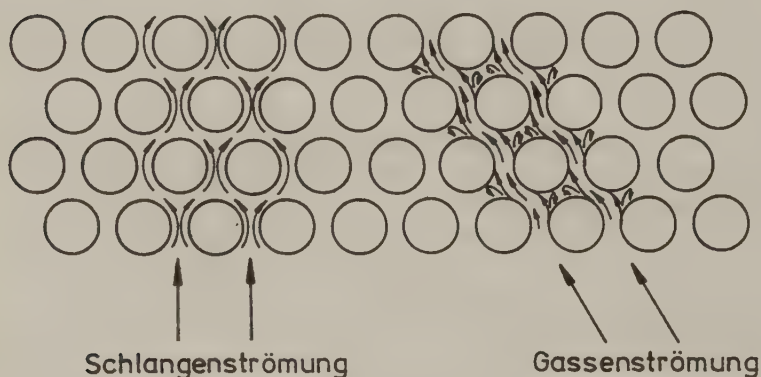
und damit eine gute Übereinstimmung des aus den Meßwerten extrapolierten Randwertes mit den höchsten in der Literatur angegebenen Widerständen. Die kleinsten in der Literatur angegebenen Werte liegen etwa 30 % unter dem höchsten Wert, was sich auch für die Widerstände bei Querströmung gezeigt hat.

Die Re-Zahl-Abhängigkeit der bei Schrägströmung ermittelten axialen Widerstandsbeiwerte ($\kappa_y = -0,20$) weicht nicht von der in /7/ und /8/ angegebenen Gesetzmäßigkeit ab ($-0,20 \geq \kappa_y \geq -0,25$).

Der direkte quantitative Vergleich der gemessenen Druckgradienten bei Dreiecks- und Vierecksanordnung ist nicht möglich, da einerseits eine unterschiedliche Stabteilung (s/d) und andererseits eine andere Strömungsführung vorliegt.

Die Strömung durch das Dreiecksgitter verläuft "schlangenförmig" und nicht "gassenförmig" wie im Fall der quadratischen Gitteranordnung. Bei gleicher Strömungsführung hätte die Anströmrichtung des Dreiecksgitters um 30° versetzt werden müssen.

Die nachfolgende Skizze soll den Unterschied beider Strömungsführungen durch ein Stabgitter mit Dreiecksanordnung und das daraus resultierende Strömungsbild verdeutlichen:



Der gassenförmige Strömungsverlauf läßt aufgrund der relativ großen Totwassergebiete hinter den Stäben höhere Wirbelanteile und damit auch höhere Widerstände erwarten. Diese Vermutung wird durch den Vergleich der Messungen von /1/ mit denen von /9/ für ein quer angeströmtes Gitter erhärtet. In /9/ wurde eine Dreiecksanordnung für $\alpha = 90^\circ$ mit gleicher Gitterteilung wie in /1/ schlangenförmig durchströmt. Die dabei gemessenen Widerstände waren etwa doppelt so hoch wie die der fluchtenden, quadratischen Anordnung, die von /1/ auch bei Querströmung untersucht wurde.

Darüberhinaus ist aus /9/ im Vergleich mit den in dieser Arbeit aufgeführten eigenen Meßergebnissen der Einfluß der Stabteilung auf den Strömungswiderstand zu entnehmen. In /9/ wurden für eine Teilung von $s/d = 1,2$ im Fall der untersuchten Querströmung um ca. 15 % höhere Widerstandsbeiwerte gemessen als bei dem hier untersuchten "aufgeweiteten" Gitter mit $s/d = 1,32$ und gleicher Strömungsführung. In diesem Vergleich ist der Widerstandsbeiwert, der auf eine charakteristische Länge von 1 m bezogen wird, bei dem engeren Gitter allein schon wegen der höheren Anzahl von Rohrreihen größer als bei einem mit gleichem Stabdurchmesser aufgeweiteten Gitter.

Obwohl die Meßergebnisse der hier vorliegenden Arbeit demnach mit den Ergebnissen nach /1/ nicht betragsmäßig übereinstimmen können, zeigen die vom Anstellwinkel α abhängigen Druckgradienten bei Dreiecks- und Vierecksanordnung einen ähnlichen Verlauf (siehe Bild 61). Dabei wirken sich der in /1/ unterschiedliche Gitterparameter (engere Spalte bei kleinerer Teilung) sowie die unterschiedliche Gitterstruktur und die daraus resultierende Strömungsführung besonders auf die Beträge der radialen Druckgradienten aus, während sich die axialen Gradienten betragsmäßig weniger stark voneinander unterscheiden.

In /10/ werden Widerstandsbeiwerte für Quer- und Längsströmung unter Natrium angegeben, wobei der Aufbau des Gitters dem Konzept des Offenen Cores entspricht. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Stabdurchmesser (6 mm bzw. 20 mm) und damit die bei den dünneren Stäben um den Faktor 3,3 höhere Anzahl von Stäben pro Längeneinheit, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung der aus den Messungen extrapolierten Randwerte mit den Angaben in /10/, wobei die Re-Zahlen wegen der Stabdurchmesser und Stoffwerte (Natrium, Wasser) um 12 % voneinander abweichen:

$$\frac{Re_{\text{Wasser}}}{Re_{\text{Natrium}}} = \frac{d_{\text{Wasser}}}{d_{\text{Natrium}}} \frac{v_{\text{Natrium}}}{v_{\text{Wasser}}} = 1,12 \quad (73)$$

Somit entspricht eine gemessene Re-Zahl von 10^5 einer in /10/ angegebenen Re-Zahl von ca. $9 \cdot 10^4$. Für die Spaltstoffzone des Offenen Cores ergibt sich aus /10/ bei $Re = 9 \cdot 10^4$ ein Querwiderstand von 105 pro m oder umgerechnet 0,78 pro Rohrreihe, was von den Meßergebnissen nach (68) nur um 3 % nach unten abweicht.

Die entsprechende Abweichung bei den Längswiderständen beträgt allerdings ca. 30 % in die gleiche Richtung. Dieser Unterschied liegt darin begründet, daß der als Randbedingung eingesetzte Grenzwert der Längsströmung ohnehin im Bereich der höchsten Literaturwerte angesiedelt ist, um eine Übereinstimmung mit dem aus den Messungen extrapolierten Grenzwert zu erzielen.

Der Streubereich der Widerstandsbeiwerte steht durchaus im Einklang mit den aus /6/ und aus /10/ zu entnehmenden Ergebnissen, wo der Vergleich der von verschiedenen Autoren bei gleicher Anordnung gewonnenen Druckverlustbeiwerte zeigte, daß, z.T. durch Sekundäreinflüsse hervorgerufen, mit einem größeren Streubereich (± 30 %) gerechnet werden muß.

Weiterhin ist zu erwähnen, daß auch die in /2/ angegebene Winkelabhängigkeit der Druckgradienten für eine anisotrope Stabgitterströmung allein über Anpassung der Konstanten in den Matrixelementen nach (51) wiedergegeben werden kann. Diese Untersuchung wurde in /11/ aufgrund der Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit durchgeführt.

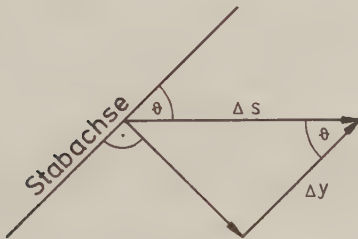
Abschließend soll auf eine Interpretationsmöglichkeit hingewiesen werden für die in dieser Dissertation vorgestellte, modifizierte Darstellungsform von Druckgradienten in einer anisotropen Strömung:

Dabei wird die Hypothese (14) aufgegriffen, daß sich der Druckabfall jeweils additiv aus einem wirbelfreien und einem wirbelbehafteten Anteil zusammensetzt.

Unterstellt man eine schraubenförmige Wirbelströmung parallel zur Stabachse, die von der mittleren Geschwindigkeit $\vec{u}$ des Massentransports angetrieben wird, so resultiert daraus ein Druckabfall entlang eines Weges Δs , den die Wirbelströmung mit der Umfangsgeschwindigkeit w zurücklegt:

$$(\Delta p)_w = - \frac{\rho}{2} u (\zeta_w w) \Delta s \quad (74)$$

Die Wegstrecke Δs des Wirbels verlängert sich bei konstanter Wegstrecke Δy mit zunehmendem Anstellwinkel des Stabgitters:



$$\Delta s = \Delta y / \cos \theta$$

Berücksichtigt man, daß im Wirbelgebiet, d.h. im Totwassergebiet zwischen den Gitterstäben, die Wirbelgeschwindigkeit proportional zu der sie antreibenden mittleren Geschwindigkeit des Massentransports ist ($w \approx u = u_y / \cos \theta$), so gilt mit $\zeta_w \equiv (\zeta_w)_y$:

$$\frac{(\Delta p)_w}{\Delta y} = - \frac{\rho}{2} u \left[\frac{(\zeta_w)_y}{\cos^2 \theta} u_y \right] \quad (75)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor zwischen w und u in $(\zeta_w)_y$ enthalten ist.

Damit sind die Beziehungen (74) und (75) identisch.

Wenn man im Fall der Schrägströmung den Druckverlust der wirbelfreien Anteile unabhängig von (75) in der Form

$$\frac{(\Delta p)_f}{\Delta y} = - \frac{\rho}{2} u [(\zeta_f)_y u_y] \quad (76)$$

ausdrückt und die beiden Anteile (75) und (76) zu einem Gesamtdruckabfall in axialer Richtung zusammenfaßt, so ergibt sich:

$$\frac{\Delta p}{\Delta y} = - \frac{\rho}{2} u [(\zeta_f)_y + \frac{(\zeta_w)_y}{\cos^2 \theta}] u_y \quad (77)$$

In (77) läßt sich der Ausdruck $\cos^{-2} \theta$ durch $(1 + \tan^2 \theta)$ und

und dieser näherungsweise durch $(1 + \frac{\sin^2 \theta}{B_y + \cos^2 \theta})$ ersetzen.

Hierbei ist die Konstante B_y sehr klein gegenüber 1 ($B_y \ll 1$) und wird nur zur Vermeidung der Singularität im Fall $\theta = 90^\circ$ eingeführt. Man erhält dann aus (77):

$$\frac{\Delta p}{\Delta y} = - \frac{\rho}{2} u [(\zeta_w + \zeta_f)_y + (\zeta_w)_y \frac{\sin^2 \theta}{B_y + \cos^2 \theta}] u_y \quad (78)$$

Aus trigonometrischen Gründen ist der Ausdruck

$$\sin^2 \theta u_y = \sin \theta \cos \theta u_x,$$

so daß (78) mit dem Widerstandsbeiwert C_y für eine reine Parallelströmung übergeht in

$$|(\text{grad } p)_y| = \frac{\rho}{2} u [C_y u_y + (\zeta_w)_y \frac{\sin \theta \cos \theta}{B_y + \cos^2 \theta} u_x] \quad (79)$$

wobei $C_y = (\zeta_w + \zeta_f)_y$ ist, was auch aus Gleichung (77) für den Grenzfall der Längsströmung ($\theta = 0^\circ$) ersichtlich ist.

Der Vergleich von (79) mit dem Gleichungssystem (21) und mit den Funktionen in (22) zeigt, daß die Konstanten B_y jeweils gleich groß sind und $(\zeta_w)_y$ identisch der Konstanten $(C_x - C_y)A_y$ ist.

Für die radiale Richtung läßt sich ein einfacherer Weg zur Interpretation des Druckgradienten finden:

Beide Teilströmungen erfahren auf ihren Wegstrecken einen Druckverlust in radialer Richtung, der - ähnlich einer Rohrströmung - proportional dem jeweiligen Geschwindigkeitsquadrat ist. Faßt man beide Druckverlustanteile zusammen, so ergibt sich:

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = - \frac{\rho}{2} [(\zeta_f)_x + (\zeta_w)_x] u_x^2 = - \frac{\rho}{2} \zeta_x u_x^2 \quad (80)$$

wobei $\zeta_x = (\zeta_f)_x + (\zeta_w)_x$

In Bild 62 wird gezeigt, daß (80) gut übereinstimmt mit dem aus dem Gleichungssystem (21) resultierenden, radialen Druckgradienten, wobei die Druckgradienten für $Re = 50\,000$ dargestellt und auf den Maximalwert bei $\theta = 90^\circ$ normiert sind.

Damit verlaufen die radialen Druckgradienten annähernd mit dem Quadrat der radialen Geschwindigkeitskomponente (u_x^2) bzw. mit $\sin^2 \theta$ ($u_x^2 = u^2 \sin^2 \theta$).

Wie bereits bei der Darstellung der Meßergebnisse in Kapitel 6.4.1. erwähnt, ist es allerdings nicht zweckmäßig, die radiale Komponente des Druckgradienten über u_x^2 und analog dazu die axiale Komponente über u_y^2 auszudrücken.

6.4.3. Fehlerabschätzung der Meßergebnisse

Der Einfluß der bei den Messungen auftretenden Fehler wird durch den zufälligen und den systematischen Fehler erfaßt. Der systematische Fehler ist dabei der einer bestimmten Meßanordnung bzw. einem bestimmten Meßverfahren eingeprägte Fehler und resultiert aus dem Versuchsaufbau bzw. der Versuchsdurchführung selbst.

Jeder einzelne systematische Fehler hat stets die gleiche Tendenz und den gleichen Betrag, der reproduzierbar ist. Dagegen erfaßt der zufällige (statistische Fehler) jene Ungenauigkeiten, die aus stochastischen Schwankungen einzelner Einflußgrößen herrühren.

Systematischer Fehler der mittleren Geschwindigkeit

Nach den Beziehungen (24) und (63) läßt sich die mittlere Geschwindigkeit $\vec{u}$, die den Druckgradienten im Stabgitter theoretisch zu Grunde liegen soll, betragsmäßig wie folgt bestimmen:

$$|\vec{u}| = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\dot{V}}{A_{\infty}} \quad (81)$$

In (81) ist $\dot{V}$ der im Anströmquerschnitt A_{∞} der Meßstrecke vorliegende Volumenstrom.

Bei gleichmäßiger Beaufschlagung aller n Kanäle, die sich mit der Breite $(s - d)$ quer zur Strömungsrichtung befinden, würde - ohne das Auftreten von Bypaßströmen - die mittlere Geschwindigkeit in jedem Kanal des Meßeinsatzes identisch sein:

$$u_K = \frac{1}{\gamma} \frac{n \dot{V}_K}{A_{\infty}} \quad (82)$$

In (82) bedeutet $\dot{V}_K$ der unter idealen Bedingungen vorliegende Volumenstrom in einem Strömungskanal. Dieser Wert würde anteilmäßig mit dem vom induktiven Durchflußmesser (IDM) hinter der Meßstrecke angezeigten Volumenstrom ($\dot{V}_{IDM}$) bzw. mit dem vor der Meßstrecke anstehenden Gesamtvolumenstrom $\dot{V}$ übereinstimmen, wenn man die Dichteunterschiede auf diesem Weg vernachlässigt.

Eine solche Übereinstimmung ist aus konstruktiven und meßtechnischen Gründen in der Praxis nur mit Toleranzen zu erzielen, die sich in den zulässigen Grenzen halten:

Allein schon wegen der Abschottung des Meßeinsatzes (siehe Kapitel 6.1.) läßt sich ein Bypaßstrom nicht vollständig vermeiden.

Darüberhinaus erfolgten die zur Volumenstrommessung im Meßeinsatz herangezogenen Geschwindigkeitsmessungen bzw. Druckmessungen (41) nur in maximal 2 Strömungskanälen, die quer zur Strömungsrichtung etwa in der Mitte des Meßeinsatzes lagen.

Da ein ideal gleichmäßiges Anströmprofil und damit eine absolut homogene Beaufschlagung der einzelnen miteinander verbundenen Kanäle aufgrund der konstruktiv begrenzten Einlauflänge bzw. Beruhigungsstrecke vor dem Meßeinsatz nicht zu realisieren war, hat sich aus den Messungen in einem Kanal ein mittlerer Volumenstrom ergeben, der anteilmäßig nicht exakt mit dem induktiven Durchflußmesser übereinstimmte:

$$n \dot{V}_K = a \dot{V}_{IDM} \quad (83)$$

Erwartungsgemäß sollte aber der Anteil a nahezu den Wert 1 annehmen.

Meßtechnisch wurde dieser Anteil wie folgt ermittelt:

Aus den Druck-Meßwerten im Kanal mit der Breite $(s - d)$ ergeben sich nach (41) an den in Strömungsrichtung hintereinander liegenden Meßstäben jeweils 6 lokale Geschwindigkeiten in verschiedenen Höhen quer zur Strömungsrichtung. Diese Geschwindigkeitsprofile ergeben Mittelwerte, die sich wiederum zu einem Gesamt-Mittelwert in dem betreffenden Meßkanal $(\bar{v})$ zusammenfassen lassen.

Bei einer Kanalhöhe H errechnet sich dann der tatsächlich im Kanal vorliegende mittlere Volumenstrom zu

$$\dot{V}_K = (s - d) H \bar{v} \quad (84)$$

Aus (83) und (84) ergibt sich der im Meßkanal vorliegende Volumenstromanteil:

$$a = \frac{n (s - d) H \bar{v}}{\dot{V}_{IDM}} \quad (85)$$

Die Messungen ergaben $0,98 \leq a \leq 1,07$, je nach Re-Zahl und Anströmwinkel.

Werte $a > 1$ bedeuten, daß das Geschwindigkeitsprofil in dem untersuchten Kanal so stark ausgeprägt war, daß auftretende Bypaßströme mehr als kompensiert wurden.

Der Einfluß des Bypaßstromes auf den Wert a konnte nicht separat ermittelt werden, da dieser Volumenstrom so klein war, daß er sich mit einer Prandtl-Sonde, die zwischen der Zylinder-Innenwand der Versuchsstrecke und der Außenwand des Meßeinsatzes installiert war, meßtechnisch nicht erfassen ließ.

Mit $\dot{V}_{IDM} = \dot{V}$ und $u_K = u$ erhält man aus (82) und (83):

$$u = \frac{1}{\gamma} \frac{a \dot{V}}{A_\infty} \quad (86)$$

Damit kann sich die theoretisch zu erwartende mittlere Geschwindigkeit (81) von der tatsächlich vorhandenen mittleren Geschwindigkeit (86) um den Betrag $|1 - a| \leq \max. 7 \%$ unterscheiden.

In (86) sind der Volumenstrom $\dot{V}$, der Anströmquerschnitt A_∞ und auch der zuvor eingeführte Faktor a mit einem systematischen Fehler behaftet. Die Porosität γ dagegen ist lediglich ein Umrechnungsfaktor, der so genau bestimmt werden kann, daß der daraus resultierende systematische Fehler vernachlässigbar ist.

Aufgrund des Fehleradditionsgesetzes nach /12/ berechnet sich dann der relative systematische Fehler (Es_u/u) der mittleren Geschwindigkeit u wie folgt:

$$\frac{Es_u}{u} = \frac{Es_{\dot{V}}}{\dot{V}} + \frac{Es_a}{a} + \frac{Es_{A_\infty}}{A_\infty} \quad (87)$$

Der relative Fehler des Volumenstroms ($Es_{\dot{V}}/\dot{V}$) wird den Herstellerangaben des induktiven Durchflußmessers entnommen und beträgt 1,5 %.

Der Fehler des Faktors a resultiert aus Fertigungstoleranzen bzgl. Kanalbreite ($s - d$) bzw. Kanalhöhe (H) und läßt sich mit 1,3 % abschätzen.

Wegen der größeren Dimensionen des Anströmquerschnitts (A_∞) gegenüber dem Kanalquerschnitt $[(s - d) H]$ ergibt sich für diesen relativen Fehler (Es_{A_∞}/A_∞) ein Wert von nur 0,2 %. Damit stellt sich nach (87) ein systematischer Fehler der mittleren Geschwindigkeit von 3 % ein.

Systematischer Fehler der gemessenen Druckgradienten

Aufgrund der Beziehung (44) wird der Winkel α zwischen dem Druckgradienten und der Strömungsrichtung aus den gemessenen Komponenten parallel zur Stabachse und in Strömungsrichtung bestimmt. Damit errechnet sich nach (45) die Komponente des Druckgradienten quer zur Stabachse.

Wenn man unterstellt, daß der Anstellwinkel θ des Stabgitters mit dem geforderten Wert übereinstimmt, so ergibt sich für den relativen Fehler von (44):

$$\frac{E_{\tan \alpha}}{\tan \alpha} = \frac{E_s |(\text{grad } p)_y|}{|(\text{grad } p)_y|} + \frac{E_s |(\text{grad } p)_\xi|}{|(\text{grad } p)_\xi|} \quad (88)$$

Die systematischen Fehler bei der Messung der Druckgradienten resultieren einerseits aus Fertigungstoleranzen und andererseits aus Ungenauigkeiten bei der Meßwertaufnahme und deren Weiterverarbeitung.

Die Differenzdruckaufnehmer sind mit einem systematischen Fehler von maximal 1,5 % behaftet. Hinzu kommt ein Fehler von 0,6 % der Meßwerterfassungsanlage einschl. der Meßwertverarbeitung und Meßwertausgabe.

Der Abstand der Meßsonden in Strömungsrichtung sowie deren exakte Lage parallel zur Begrenzungswand des Meßeinsatzes kann bei der Fertigung nicht so genau eingehalten werden, daß der senkrechte Abstand der Sonden zur unteren und zur oberen Wand des Strömungskanals in allen Fällen gleich groß ist (siehe Bild 26 und 27).

Die fertigungstechnisch bedingten Abweichungen ergeben einen Fehler von max. 2,5 % für die Bestimmung einer Komponente des Druckgradienten. Da sich dieser Fehleranteil in der anschließenden Meßwertverarbeitung mit 1,5 % und 0,6 % fortsetzt,

beinhaltet ein Druckgradient parallel zur Strömungsrichtung bzw. zur Stabachse im ungünstigsten Fall einen relativen systematischen Fehler von

$$[(2,5 \%)^2 + (1,5 \%)^2 + (0,6 \%)^2]^{1/2} = 3 \%$$

Damit beläuft sich der maximal mögliche Fehler von $\tan \alpha$ auf $2 \cdot 3 \% = 6 \%$.

In (45) kann man die Winkelbeziehung $\tan(\theta + \alpha)$ umschreiben zu

$$\tan(\theta + \alpha) = \frac{\tan \theta + \tan \alpha}{1 - \tan \theta \tan \alpha}$$

Um den Einfluß des Fehlers von $\tan \alpha$ auf die Funktion $\tan(\theta + \alpha)$ zu ermitteln, wird diese nach der Variablen $\tan \alpha$ differenziert, wobei $\tan \theta$ für einen bestimmten Winkel θ konstant ist.

Nach /12/ erhält man dann den systematischen Fehler der Funktion $\tan(\theta + \alpha)$:

$$E_{s_{\tan(\theta+\alpha)}} = \frac{\delta [\tan(\theta + \alpha)]}{\delta (\tan \alpha)} E_{s_{\tan \alpha}} \quad (89)$$

Der relative systematische Fehler

$$\frac{E_{s_{\tan(\theta+\alpha)}}}{\tan(\theta+\alpha)}$$

beträgt 22 % bei einem Anstellwinkel von 75° und 3 % bei $\theta = 30^\circ$, wobei der relativ hohe Fehler für $\theta = 75^\circ$ aus dem Verlauf von $\tan \theta$ resultiert.

Bei den Anstellwinkeln 45^0 und 60^0 liegt der Fehler zwischen diesen Extremwerten.

Damit beläuft sich bei den nach (45) berechneten, radialen Druckgradienten der relative systematische Fehler

$$\frac{E_s |(grad p)_x|}{|(grad p)_x|} = \frac{E_s |(grad p)_y|}{|(grad p)_y|} + \frac{E_s \tan(\theta + \alpha)}{\tan(\theta + \alpha)} \quad (90)$$

auf maximal 25 %.

Dagegen weisen die direkt gemessenen axialen Druckgradienten nur einen systematischen Fehler von 3 % auf, der auch in (90) enthalten ist.

Der relativ hohe Fehler für den nicht direkt gemessenen, sondern über $\tan(\theta + \alpha)$ aus dem axialen Druckgradienten resultierenden radialen Druckgradienten, läßt es sinnvoll erscheinen, bei zukünftigen Untersuchungen auch die radialen Druckgradienten direkt zu messen. Allerdings liegt der Fehler von maximal 25 % im Rahmen der in der Literatur /6/ angegebenen Grenzen für Strömungsuntersuchungen an Stabgittern zur Bestimmung von Widerstandsbeiwerten.

Zufälliger Fehler der Meßwerte

Die Basis zur Ermittlung der zufälligen Fehler ist die vorliegende Gaußverteilung der Meßwerte.

Zur Vermeidung der Unsicherheit beim zufälligen Fehler der Einzelmessung werden mehrere Messungen (Anzahl n) gemittelt. Dieser Mittelwert ist dann noch immer eine Zufallsgröße, da die n Werte auch nur eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit darstellen. Nach dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik ist dieser Mittelwert seinerseits Gauß-verteilt und besitzt den gleichen Erwartungswert aber eine kleinere Standardabweichung als die Einzelmessungen, wobei sich die Fehlerschranken durch

Mittelwertbildung nur proportional $1/\sqrt{n}$ verkleinern lassen:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma \quad (91)$$

Die Standardabweichung σ kann man allerdings nur durch die Auswertung von sehr vielen (theoretisch von unendlich vielen) Meßwerten gewinnen. Ist diese Standardabweichung aber nicht bekannt, so benutzt man zur Berechnung des für σ geltenden Schätzwertes die gleichen n Meßwerte mit denen auch der Mittelwert gebildet wurde. Die in diesem Fall gültigen Fehlerschranken basieren auf der Theorie der t-Verteilung, die von W.S. GOSSET unter dem Namen "STUDENT" veröffentlicht wurde ("Student-t-Verteilung"). Die Fehlerschranken bzw. Vertrauensgrenzen lassen sich damit nach folgendem Vorgehen bestimmen:

In Abhängigkeit von einer gewählten statistischen Sicherheit P (z.B. 95 %) und vom Freiheitsgrad $NF = n - 1$ ergibt sich nach /12/ (Bild 1.3 - 8) eine statistische Konstante c :

$$c = f(NF, P) \quad (92)$$

In (92) hat c den Wert 2,07 für eine statistische Sicherheit von 95 % und einem vorliegenden Stichprobenumfang von 20 (Freiheitsgrad 19).

Anschließend bestimmt man die Streuung S der Meßwerte N_i in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n N_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2 \right]} \quad (93)$$

Damit ergibt sich der Vertrauensbereich CF des aus n Messungen gewonnenen Mittelwertes M

$$CF = \frac{c}{\sqrt{n}} S \quad (94)$$

Nach (94) kann also jeder Mittelwert M^* in den Grenzen

$$M - CF \leq M^* \leq M + CF \quad (95)$$

mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten.

Der zufällige Fehler ZF errechnet sich dann prozentual zu:

$$ZF = \frac{CF}{M} 100 [\%] \quad (96)$$

Die aus (96) resultierenden zufälligen Fehler haben ein Minimum bei der Meßanordnung mit einem Stab-Anstellwinkel von $\vartheta = 75^\circ$ (max. 6 %) und ein Maximum für $\vartheta = 30^\circ$ (max. 25 %), was auf die Anzahl der in dem jeweiligen Meßeinsatz vorhandenen Gitterstäbe zurückzuführen ist.

Bezieht man zur Ermittlung des Gesamtfehlers die zuvor ermittelten systematischen Fehler mit ein:

$$\text{Gesamtfehler} = [(\text{systematischer Fehler})^2 + (\text{zufälliger Fehler})^2]^{\frac{1}{2}}$$

so erhält man für $\vartheta = 75^\circ$ einen Wert von 23 %, während für $\vartheta = 30^\circ$ der Gesamtfehler aufgrund des relativ kleinen systematischen Fehlers nur unwesentlich größer ist als der zufällige Fehler (25 %).

7. Zusammenfassung

Die Darstellung der experimentell ermittelten Widerstandsbeiwerte für Schrägströmungen durch enge Stabgitter resultiert aus folgenden Kenntnissen über den Zusammenhang zwischen Druckgradient und mittlerer Geschwindigkeit des Massentransports, die sich zu vier grundlegenden Gesichtspunkten zusammenfassen lassen:

- Der anisotrope Charakter des Strömungswiderstandes läßt sich als Vektor/Vektor-Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Druckgradient zum Ausdruck bringen.
- Die im Stabgitter vorliegende turbulente Strömung führt zu einer quadratischen Abhängigkeit des Impulsverlustes von der mittleren Geschwindigkeit des Massentransports.
- Für den Fall der isotropen Strömung, die z.B. bei einer Rohr- bzw. Filterströmung vorliegt, soll sich die Darstellungsform in die dafür bekannte Proportionalität zwischen Druckverlust und Geschwindigkeitsquadrat überführen lassen.
- Die aus der Literatur bekannten Grenzwerte der reinen Quer- bzw. Parallelströmung müssen sich aus der Darstellungsform für $\vartheta = 90^\circ$ bzw. $\vartheta = 0^\circ$ ergeben.

Diese vier Forderungen werden durch die folgende Beziehung erfüllt:

$$\text{grad } p = - \frac{\rho}{2} |\vec{u}| \underline{\underline{\vec{u}}}$$

Der Widerstandstensor $\underline{\zeta}$ beinhaltet die aus den Messungen empirisch ermittelten Matrixelemente mit den Widerstandsbeiwerten der Quer- und Längsströmung als Elemente der Hauptdiagonalen, die in der Nebendiagonalen über winkelabhängige Funktionen miteinander verknüpft sind:

$$\underline{\zeta} = \begin{pmatrix} c_x & (c_y - c_x) f_{xy}(\theta) \\ (c_x - c_y) f_{yx}(\theta) & c_y \end{pmatrix}$$

Die θ -abhängigen Funktionen des Widerstandstensors sind einander ähnlich aufgebaut:

$$f_{xy}(\theta) = \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_x + \sin^2\theta} A_x$$

$$f_{yx}(\theta) = \frac{\sin\theta \cos\theta}{B_y + \cos^2\theta} A_y$$

Die dimensionslosen Konstanten A und B müssen für die jeweils untersuchte Gitterstruktur neu festgesetzt werden, wobei deren Abhängigkeit von der Re-Zahl nur schwach ausgeprägt ist und vernachlässigt werden kann.

Es lassen sich damit Meßergebnisse von /1/ für eine fluchtende (quadratische) Gitteranordnung ebenso wiedergeben wie eigene Messungen in einer regelmäßig versetzten Stabanordnung (Dreiecksgitter) mit größerem Mittenabstand.

Auch die in /2/ angegebene Gesetzmäßigkeit der winkelabhängigen Druckgradienten einer anisotropen Strömung kann mit der neuen Darstellungsform reproduziert werden(/11/).

Die Bestimmung der Widerstandscharakteristik von engen Stabgittern ist Bestandteil eines in /13/ und /14/ vorgestellten neuen Konzepts zur Beschreibung des Strömungsfeldes in natriumgekühlten Schnellen Brütern mit kastenlosen Brennelementen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde u.a. folgenden Fragen nicht nachgegangen:

- Wie verhält sich der Druckgradient einer Dreiecksanordnung bei Änderung der azimuthalen Strömungsführung, d.h. beim Übergang von einer schlangenförmigen zu einer gassenförmigen Strömungsführung durch das Stabgitter?
- Ist es möglich, bei einer Anordnung mit geändertem Gitterparameter (z.B. s/d) und sonst gleicher Strömungsführung wie bei dem in dieser Arbeit untersuchten Gitter, die Druckgradienten ebenfalls mit der modifizierten Darstellungsform zu beschreiben, derart, daß sich lediglich die Grenzwerte der Quer- und Längsströmung ändern und darüberhinaus nur die Konstanten in den winkelabhängigen Matrixelementen neu anzupassen sind.
- Läßt sich eine Gesetzmäßigkeit zwischen den Anordnungsparametern der Gitterstruktur und den Konstanten in den Matrixelementen des Widerstandstensors finden?
- Welche physikalische Grundlage liegt der hier vorgestellten neuen Darstellungsform der Druckgradienten insbesondere den darin enthaltenen winkelabhängigen Tensorelementen zugrunde?

8. Verzeichnisse

8.1. Bilder-Verzeichnis

- Bild 1 - 4 : Dimensionslose Druckgradienten in Abhängigkeit vom gemessenen Anströmwinkel bei verschiedenen Re-Zahlen; Vergleich der Ergebnisse von Boettgenbach mit der Theorie von Hollenhorst
- Bild 5 - 8 : Dimensionslose Druckgradienten über den gesamten, extrapolierten Winkelbereich bei verschiedenen Re-Zahlen; Vergleich der Ergebnisse von Boettgenbach mit der Theorie von Hollenhorst
- Bild 9 - 12 : Dimensionslose Matrixelemente nach der Theorie von Hollenhorst auf Grund der Meßwerte von Boettgenbach in Abhängigkeit vom Anströmwinkel bei verschiedenen Re-Zahlen
- Bild 13 - 16 : Widerstandsbeiwerte bei verschiedenen Re-Zahlen; Vergleich der Theorie von Boettgenbach mit der Theorie von Hollenhorst
- Bild 17 - 19 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Vierecksanordnung nach der Theorie von Hollenhorst mit Meßwerten von Boettgenbach
- Bild 20 - 22 : Wasserkreislauf und Versuchsstrecke
- Bild 23 - 25 : Schematische Anordnung des Rohrverbandes bei den untersuchten Anströmwinkeln mit Lage der einzelnen Meßstäbe
- Bild 26 : Anordnung der Meßsonden in Strömungsrichtung
- Bild 27 : Lage der Meßsonden in Richtung der Stabachse

- Bild 28 : Radialer, normierter Druckgradient als Funktion der Re-Zahl mit dem Anströmwinkel als Parameter
- Bild 29 : Axialer, normierter Druckgradient als Funktion der Re-Zahl mit dem Anströmwinkel als Parameter
- Bild 30 - 33 : Dimensionlose Druckgradienten nach Messungen von Hollenhorst in Abhängigkeit vom gemessenen Anströmwinkel bei verschiedenen Re-Zahlen; Vergleich zwischen Messung und Theorie nach Hollenhorst
- Bild 34 - 37 : Dimensionslose Druckgradienten nach der Theorie von Hollenhorst aufgetragen über den extrapolierten Winkelbereich bei verschiedenen Re-Zahlen
- Bild 38 - 41 : Dimensionslose Matrixelemente nach der Theorie und auf Grund der Meßwerte von Hollenhorst
- Bild 42 - 45 : Druckabfall pro m Längeneinheit in radialer und axialer Richtung nach der Theorie von Hollenhorst, aufgetragen über den extrapolierten Winkelbereich bei verschiedenen Re-Zahlen
- Bild 46 - 48 : Normierter Druckgradient und Widerstandsbeiwert als Funktion von Anströmwinkel und Re-Zahl
- Bild 49 - 54 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung nach der Theorie von Hollenhorst mit Meßwerten von Hollenhorst
- Bild 55 - 60 : Vektorielle Darstellung von gemessenen Druckgradienten als Beispiel für einige Versuchs- und Meßreihen
- Bild 61 : Vergleich der Druckgradienten bei Dreiecks- und Vierecksanordnung des Stabgitters
- Bild 62 : Verlauf der radialen Druckgradienten mit $\sin^2 \alpha$

8.2. Literaturverzeichnis

- /1/ Böttgenbach, H.:
Messung von Strömungsfeldern in engen Stabbündeln zur
Überprüfung einer anisotropen Strömungsfeldtheorie
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1977)
Abteilung für Maschinenbau
- /2/ Winter, J.:
Experimentelle Ermittlung von Stromlinien in einem engen
Brennstabgitter mit Schikanen zur Überprüfung einer an-
isotropen Widerstandshypothese
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1978)
Abteilung für Maschinenbau
- /3/ Bente, H.:
Thermohydraulische Analyse eines neuen Schnellen Brüter-
kerns mit offenen Brennelementen im Hinblick auf das Stör-
fallverhalten
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1983)
Abteilung für Maschinenbau
- /4/ Flügge, H.:
Entwicklung und Anwendung eines Laser-Zwei-Fokus-Meßver-
fahrens zur Untersuchung von Strömungsgeschwindigkeiten
in engen Stabgittern
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1982)
Abteilung für Maschinenbau
- /5/ Gersten, K.:
Einführung in die Strömungsmechanik
Bertelsmann Universitätsverlag Düsseldorf (1974)
- /6/ VDI-Wärmeatlas
VDI-Verlag Düsseldorf (1963) Ld2

- /7/ Peschel, H.:
Zusammenstellung und kritischer Vergleich aller verfügbaren Daten und Berechnungsmethoden des Druckverlustes an quer- und längsangeströmten Glattrohrbündeln
Studienarbeit, Ruhr-Universität Bochum (1974)
Lehrstuhl für Reaktortechnik, Arbeit unveröffentlicht
- /8/ Böttgenbach, H.:
Strömungswiderstand von quer- und längsangeströmten Stabbündeln
Atomkernenergie 26 (1975)
- /9/ Brockmann, K.:
Messungen von Widerstandsbeiwerten für querangeströmte Stabbündel in enger Dreiecksanordnung
Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum (1977)
Lehrstuhl für Reaktortechnik, Arbeit unveröffentlicht
- /10/ Böse, H.:
Parameter-Untersuchung zu einer ersten Auslegung der Thermohydraulik eines SNR-Kerns mit offener Brennelementanordnung
Studienarbeit, Ruhr-Universität Bochum (1983)
Lehrstuhl für Reaktortechnik
unveröffentlicht
- /11/ Tschirner, U.:
Darstellung und Deutung von Druckgradienten einer anisotropen Stabgitterströmung zur Überprüfung eines vorgegebenen Widerstandstensors
Studienarbeit, Ruhr-Universität Bochum (1983)
Lehrstuhl für Reaktortechnik
unveröffentlicht
- /12/ Profos, P.:
Handbuch der industriellen Meßtechnik
Vulkan-Verlag Essen (1974)

/13/ Ziegler, A.:

Strömungsfeld in Reaktoren mit offenen Brennelementen
Atomkernenergie 27 (1976)

/14/ Ziegler, A.:

Ein neues Konzept für den natriumgekühlten Schnellen
Brüter

Brennstoff-Wärme-Kraft 35 (1983)

8.3. Nomenklatur-Verzeichnis

Größe	Einheit	Bedeutung
A	-	Konstante im Matrixelement
a	-	Faktor für anteiligen Volumenstrom
A_{∞}	m^2	Anströmquerschnitt
B	-	Konstante im Matrixelement
C	-	Konstante im Matrixelement
c	-	statistische Konstante
C_1	N/m^3	konstante Komponente des Druckgradienten
C_2	N/m^3	konstante Komponente des Druckgradienten
CF	-	statistischer Vertrauensbereich
d	m	Stabdurchmesser (Rohraußendurchmesser)
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
Es	%	relativer systematischer Fehler
f	-	Funktion
F	-	Funktion
$\vec{g}$	m/s^2	Erdbeschleunigung
I	N/m^2	Integrationskonstante bei der Bestimmung des Druckfeldes
l	m	charakteristische Länge
$\vec{k}$	N/m^3	Volumenkraft
M	N/m^2	Mittelwert der gemessenen Drücke
N	N/m^2	Druck-Meßwert
n	-	Anzahl der Meßwerte
N_f	N/m^3	Bezugsgröße für die Druckgradienten

Größe	Einheit	Bedeutung
NF	-	Freiheitsgrad
P	%	statistische Sicherheit
p	N/m ²	Druck
Q	-	Quotient aus Widerstandsbeiwerten
Re	-	Reynoldszahl
s	m	Stabmittenabstand
S	%	statistische Streuung
t	s	Zeit
u	m/s	mittlere Geschwindigkeit des Massen- transports
u _∞	m/s	Anströmgeschwindigkeit
U	m ² /s ²	Kraftpotential
v	m/s	lokale Geschwindigkeit im Stabgitter
$\bar{v}$	m/s	Mittelwert der lokalen Geschwindig- keiten
V	m ³	Volumen
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom
w	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Wirbel
w _e	m/s	Geschwindigkeit im engsten Spalt
ZF	%	relativer zufälliger Fehler
α	grd	Winkel: Druckgradient/Strömungsrich- tung
γ	-	Porosität des Stabgitters (Volumen- anteil des Fluids im Stabgitter)
δ	grd	Drehwinkel des Koordinatensystems
ε	grd	Winkel zwischen Druckgradient und seiner radialen Komponente

Größe	Einheit	Bedeutung
ζ	m^{-1}	Widerstandsbeiwert
$\underline{\zeta}$	m^{-1}	Widerstandstensor
η	kg/(ms)	dynamische Zähigkeit
θ	grad	Winkel: Stabachse/Strömungsrichtung
x	-	Exponent der Re-Zahl
v	m^2/s	kinematische Zähigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	%	Standardabweichung
$\bar{\sigma}$	%	mittlere Standardabweichung

Koordinaten

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
x	m	x-Koordinate (quer zur Stabachse)
y	m	y-Koordinate (parallel zur Stabachse)
ξ	m	ξ -Koordinate (in Strömungsrichtung)
η	m	η -Koordinate (quer zur Strömungsrichtung)

Sonderzeichen	Bedeutung
$\propto$	proportional
$\equiv$	Definition
*	spezielle Festlegung einer Größe

Abkürzungen	Bedeutung
ax	axial
F	Fluid
f	wirbelfreie Strömungsanteile
ges	gesamt
K	Kanal
Lit	Literatur
Meß	Meßstelle
o	Bezugsgröße (Stelle $\xi = 0$, $\eta = 0$)
rad	radial
Ref	Referenzgröße
S	Stäbe
stat	statisch
w	wirbelbehaftete Strömungsanteile

Lebenslauf

Persönliches:

Dieter Hollenhorst
geboren am 20. Januar 1949
in Recklinghausen/Westf.

Schulische Ausbildung:

1955-1960 Besuch der Volksschule in Recklinghausen
1960-1961 Besuch des Gymnasiums Canisianum
in Lüdinghausen
1961-1968 Besuch des Hittorf-Gymnasiums
in Recklinghausen
Reifeprüfung Mai 1968
1968-1973 Studium des Maschinenbaus an der
Ruhr-Universität Bochum
Abschluß der Diplomprüfung WS 1972/73

Berufstätigkeit:

1973-1974 Versuchsingenieur bei der Firma
Uranit GmbH in Jülich
Test von Anlagenkomponenten zur Uran-
anreicherung nach dem Zentrifugenver-
fahren
1975-1978 Verfahrensingenieur bei der Firma
Still GmbH in Recklinghausen
Planung und Auslegung von Kokereian-
lagen
seit Oktober 1978 Wissenschaftlicher Assistent am Lehr-
stuhl für Reaktortechnik der Ruhr-Uni-
versität Bochum unter der Leitung von
Prof. Dr. rer. nat. A. Ziegler

Anhang

Meßwerte

ANSTELLWINKEL THETA 75.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 27.0 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.367E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
 AUSTRITTSDRUCK

72060.
 49926.
 N/M**2
 N/M**2
 MESSEIHE 23

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	68582.	64745.	62918.	61274.	58948.	56583.	53605.	53129.
2	68019.	65580.	63836.	61781.	59423.	58183.	56188.	54044.
3	67785.	65571.	63669.	61921.	59419.	58531.	56539.	53966.
4	68299.	65331.	64182.	61945.	60384.	56051.	52932.	52932.
5	67469.	65616.	64020.	62510.	60336.	58445.	55636.	53454.
6	67730.	65928.	64043.	62573.	60700.	57844.	55955.	54498.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	8.7	4.6	4.1	6.9	5.0	7.2	3.3	5.8
2	6.4	3.9	4.0	6.0	6.1	7.7	4.7	3.9
3	5.7	3.7	4.3	6.6	6.3	6.3	4.5	4.9
4	4.1	4.6	6.7	7.0	4.7	5.0	4.4	6.4
5	3.2	5.8	6.0	6.3	6.0	4.9	5.7	6.8
6	5.1	4.0	5.1	3.8	5.5	3.2	6.5	4.7

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	61914.	60487.	59115.	57186.	53978.	51280.	49787.	49086.
2	62799.	60231.	58258.	56545.	52858.	51287.	50010.	46922.
3	62427.	60543.	58277.	55622.	53314.	51821.	50328.	46726.
4	63758.	60240.	57832.	55937.	54295.	52928.	49824.	45558.
5	63573.	63863.	58280.	56627.	54738.	52384.	48129.	45520.
6	63515.	60631.	59085.	58452.	54020.	51474.	48711.	47749.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	3.7	4.3	6.1	5.8	5.2	5.6	4.5	4.4
2	4.8	5.6	2.1	4.2	5.1	6.2	5.5	4.5
3	5.2	4.6	4.8	5.7	3.7	6.3	7.0	3.9
4	3.3	3.5	5.3	4.0	4.5	6.5	5.6	5.6
5	4.7	10.4	5.7	4.7	4.8	5.7	5.7	4.7
6	4.0	3.7	3.6	13.6	4.7	5.1	3.9	4.5

ANSTELLWINKEL THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

75.0
27.7
0.485E-01

GRD
C
M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
AUSTRITTSDRUCK

74338.
48124.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 24

GESAMTD RUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	72391.	67019.	63510.	60775.	56915.	53287.	48970.	47375.
2	73380.	67509.	64470.	61980.	58867.	55276.	52695.	49520.
3	71736.	67856.	64464.	61671.	59137.	56085.	53327.	49082.
4	72167.	67959.	62922.	62555.	59292.	56529.	53054.	48129.
5	71324.	68325.	66171.	62254.	59644.	56398.	52382.	49104.
6	72119.	69479.	66240.	63542.	59751.	55897.	52599.	50417.

STUFUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTD RUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	6.2	6.6	5.3	5.8	4.6	5.0	4.3	5.1
2	5.4	3.5	5.1	5.0	4.5	4.6	5.2	5.9
3	5.1	2.4	5.3	4.0	5.1	6.0	7.0	4.9
4	5.8	3.2	5.3	6.2	4.6	6.0	4.5	6.7
5	5.1	7.2	6.2	4.1	6.1	6.3	4.8	6.2
6	3.6	3.8	5.1	4.8	5.0	5.4	5.4	6.8

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	62406.	58050.	55801.	53498.	49477.	43984.	41944.	39402.
2	60545.	57090.	55635.	51861.	46325.	42689.	41158.	35693.
3	62104.	58883.	55271.	50123.	44954.	44568.	41338.	35768.
4	63981.	58012.	55064.	50926.	47673.	45260.	40620.	33559.
5	64756.	64753.	54871.	51560.	48469.	44766.	38918.	33330.
6	64709.	59645.	56056.	52950.	48719.	44829.	40321.	37922.

STUFUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	5.9	3.6	5.5	5.9	6.6	6.0	6.7	4.9
2	7.3	5.0	4.8	4.3	5.3	3.7	6.0	4.8
3	5.5	6.0	4.6	3.5	5.0	4.2	5.0	4.6
4	3.8	3.7	5.8	2.6	5.2	6.0	6.3	5.6
5	4.4	6.5	6.0	4.2	3.6	4.8	5.3	4.5
6	4.0	5.5	5.9	4.2	4.5	4.9	6.3	6.1

ANSTILWINKEL THETA 75.0 GRD
MITTLERE TEMPERATUR 26.6 C
GESAMT-VOLUMENSTROM 0.600E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
AUSTRITTSDRUCK

90509.
51334.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 25

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	88651.	78004.	74129.	69650.	63932.	60022.	51143.	50174.
2	88553.	81107.	75947.	72152.	66913.	61828.	58537.	53087.
3	87005.	80565.	75844.	72418.	67350.	64035.	58257.	53290.
4	87088.	80862.	77238.	72146.	68271.	63458.	58259.	51419.
5	86491.	82041.	77360.	73455.	68447.	63684.	57998.	51620.
6	87694.	82391.	78547.	74404.	68855.	63146.	57299.	54588.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	4.7	4.3	3.6	3.0	4.1	4.2	3.0	4.1
2	3.6	3.3	3.6	3.8	3.1	2.6	2.8	2.5
3	4.9	4.3	3.3	4.0	4.0	4.6	3.0	3.8
4	4.5	3.6	4.4	4.3	3.7	5.0	3.4	3.7
5	3.1	5.2	3.0	5.2	4.2	4.0	3.4	3.2
6	3.5	2.8	5.2	5.3	5.9	4.5	2.5	3.7

STATISTISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	67345.	66770.	63274.	58110.	52575.	44937.	40558.	38411.
2	67669.	64318.	61788.	55311.	47996.	41930.	39209.	31147.
3	71080.	66401.	61207.	53885.	48013.	45008.	39580.	31429.
4	74075.	65201.	60315.	53901.	49969.	45451.	38659.	27878.
5	76716.	75915.	60111.	55559.	50044.	45387.	36249.	26783.
6	76163.	67564.	62690.	58370.	51062.	45864.	38640.	35440.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISTISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	3.9	3.9	3.6	5.0	4.6	3.4	3.9	4.4
2	4.7	4.2	5.0	4.0	4.9	4.0	3.3	5.3
3	2.9	3.0	3.7	3.8	3.8	1.7	2.4	3.3
4	5.6	2.9	4.3	3.1	3.2	4.8	3.9	4.2
5	3.4	3.9	3.9	3.0	3.7	3.5	4.6	2.6
6	3.8	3.9	2.8	5.8	3.5	4.8	4.3	4.7

ANSTEUERUNG THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

75.0
27.1
0.728E-01 M**3/SEC

GRD
C
AUSSTRITTSDRUCK

115590.
46948.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 26

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	104423.	92150.	85494.	80185.	71560.	64350.	54126.	49923.
2	106504.	96414.	89670.	83025.	76126.	68617.	63487.	55925.
3	104236.	95781.	88269.	83698.	76770.	70803.	64006.	556034.
4	104503.	95091.	90117.	83175.	77476.	70678.	63087.	53581.
5	103174.	97448.	90688.	84418.	78277.	71325.	62998.	53914.
6	105127.	97774.	91969.	86108.	78287.	70842.	61821.	57360.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	2.9	3.9	3.3	2.8	2.8	2.4	2.3	1.9
2	5.0	2.7	2.8	4.3	3.2	3.1	3.6	2.4
3	5.4	3.8	4.0	3.4	4.3	2.6	2.4	2.9
4	2.2	4.6	3.6	2.9	2.4	3.3	2.6	2.4
5	3.2	2.3	3.5	3.1	2.7	3.0	2.6	3.4
6	2.8	2.7	4.7	3.7	3.0	3.0	3.9	2.8

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	77713.	70920.	68857.	62105.	54605.	43227.	37704.	33280.
2	78311.	68179.	65765.	57956.	46343.	38155.	34294.	22022.
3	81175.	72893.	66340.	55517.	47568.	42467.	34976.	23288.
4	84715.	73422.	65768.	56062.	49685.	44169.	34086.	17859.
5	88578.	73695.	64937.	57799.	50580.	43735.	30516.	16296.
6	88648.	75731.	68628.	61815.	52339.	45342.	34159.	30481.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	2.5	4.0	3.7	3.9	3.3	2.5	4.0	2.7
2	3.1	3.4	2.3	2.7	3.3	2.7	2.7	2.1
3	3.3	3.5	2.7	3.8	4.7	2.7	3.2	3.4
4	3.6	3.4	2.7	2.9	3.3	2.4	2.0	3.9
5	2.8	2.5	3.1	2.7	2.7	2.6	2.5	3.0
6	2.4	3.9	3.0	2.3	2.8	3.0	3.7	3.6

ANSTELLWINKEL THETA 75.0 GRD
MITTLERE TEMPERATUR 26.8 C
GESAMT-VOLUMENSTROM 0.856E-01 M**3/SEC

148787. N/M**2
53594. N/M**2

MESSREIHE 27

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	134644.	116836.	106786.	98920.	88300.	76656.	63611.	58573.
2	135365.	121399.	112420.	103331.	93837.	83613.	76721.	66034.
3	130215.	120545.	111289.	103677.	94547.	86394.	76944.	67016.
4	131792.	120578.	113098.	103841.	95621.	86150.	76503.	62344.
5	129511.	121771.	114065.	104807.	96545.	87288.	75769.	63898.
6	132545.	123594.	114938.	107078.	96580.	86024.	74748.	67438.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	2.1	2.5	2.5	1.5	1.7	2.1	1.9	2.6
2	1.9	2.5	1.9	1.6	1.4	2.6	3.1	2.0
3	6.8	2.5	1.9	3.1	2.8	1.7	2.2	2.1
4	2.3	2.2	2.2	2.0	2.3	2.3	1.9	2.3
5	1.5	1.8	1.9	1.9	1.6	2.5	1.6	2.6
6	1.2	1.6	1.9	2.9	2.0	2.0	2.0	2.0

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	94904.	84790.	82737.	74986.	65451.	48950.	40578.	33370.
2	95425.	81664.	77887.	68277.	51953.	40506.	35450.	17777.
3	99766.	87724.	80256.	64311.	53641.	47555.	36465.	20365.
4	103709.	88523.	78289.	65515.	57599.	48730.	34989.	11934.
5	106383.	90193.	78527.	68128.	57279.	49123.	30334.	10258.
6	110071.	93984.	83618.	73826.	61208.	50884.	35961.	30579.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	2.5	2.1	1.8	2.0	2.2	2.0	2.0	1.7
2	2.0	2.9	1.8	1.4	1.3	1.8	1.9	1.5
3	2.4	2.6	2.0	2.5	1.7	1.7	2.5	2.3
4	2.5	2.1	2.0	2.5	4.2	2.0	1.8	1.8
5	1.6	1.5	3.0	1.9	1.8	1.4	2.6	2.9
6	2.5	1.9	2.0	2.0	2.5	1.4	1.7	1.7

ANSTELLWINKEL THETA 60.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 27.6 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.375E-01 M**3/SEC
 EINTRITTSDRUCK 66811.
 AUSTRITTSDRUCK 54235.
 N/M**2
 MESSREIHE 33

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	65138.	62765.	62246.	60642.	58303.	57363.	54430.	53374.
2	66656.	64042.	62785.	60995.	59569.	57615.	56630.	54390.
3	65963.	63717.	62132.	61201.	59718.	58383.	58153.	54198.
4	66268.	63790.	62626.	60975.	60063.	58229.	56264.	54560.
5	65924.	64310.	63033.	61736.	60397.	58403.	56935.	54283.
6	66082.	64720.	63309.	61927.	60440.	58550.	56846.	55292.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	6.8	6.2	6.5	9.1	8.0	8.8	7.1	7.6
2	9.6	4.5	8.9	6.0	8.9	9.4	5.9	10.3
3	5.3	5.9	5.4	8.3	6.7	7.2	7.2	6.1
4	8.6	5.1	6.4	4.8	6.6	3.8	6.0	5.9
5	6.0	6.0	6.9	5.4	6.6	4.5	6.8	7.0
6	7.2	6.3	5.6	7.8	6.2	7.0	8.6	4.9

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	60792.	59796.	58393.	57328.	55327.	52748.	51119.	51318.
2	61125.	59555.	58560.	56303.	54298.	51923.	51205.	48937.
3	60750.	60222.	58017.	56313.	54723.	53104.	51435.	48386.
4	63058.	60153.	58014.	56453.	55429.	53347.	50811.	47106.
5	63398.	60333.	58780.	57073.	55890.	52994.	49860.	47272.
6	63710.	60638.	59514.	57748.	55994.	53438.	51128.	49993.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	5.5	8.3	6.3	6.7	5.9	6.5	5.1	5.6
2	6.9	5.6	4.7	6.5	4.8	5.3	5.3	5.2
3	5.0	4.5	4.3	7.7	5.1	5.7	5.0	4.9
4	5.1	5.2	7.3	6.5	4.6	4.8	5.0	8.8
5	5.0	5.5	5.2	4.2	8.7	4.1	5.6	5.9
6	4.6	7.2	8.2	4.4	4.8	5.3	5.4	6.9

ANSTELLWINKEL THETA 60.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 28.5 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.441E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
 AUSTRITTSDRUCK

70391.
 48905.

N/M**2
 N/M**2

MESSREIHE 34

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	65854.	63838.	60689.	58881.	56010.	53235.	50404.	47740.
2	69332.	64130.	62326.	60618.	57829.	55793.	52418.	49964.
3	67212.	64388.	62424.	59942.	58790.	55293.	53141.	49986.
4	67907.	65380.	62406.	61322.	57930.	56321.	49763.	53202.
5	67614.	65359.	63651.	60796.	59343.	56555.	53572.	50602.
6	67849.	66546.	63137.	61890.	59854.	56027.	54025.	50892.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	6.6	7.9	6.4	7.3	11.1	8.5	8.1	7.1
2	9.5	6.8	5.1	7.0	11.6	9.2	8.0	6.6
3	5.9	5.0	6.2	6.7	8.0	5.9	7.8	6.6
4	7.4	9.4	6.0	5.7	6.0	5.8	9.5	8.1
5	7.0	6.6	8.2	6.7	7.6	7.6	10.7	6.6
6	12.9	6.2	7.2	8.0	6.8	7.4	8.0	8.0

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	57496.	58027.	55274.	53917.	51434.	46430.	45080.	44029.
2	58911.	57431.	55944.	52583.	48334.	46491.	43662.	40073.
3	59187.	58718.	55462.	51842.	50605.	47119.	44145.	40070.
4	63159.	58279.	54885.	53084.	49846.	47626.	43657.	36653.
5	63894.	58529.	56834.	52771.	51136.	47212.	41116.	38052.
6	63750.	59820.	56672.	54171.	52261.	47409.	45429.	41932.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	8.3	6.0	7.2	7.3	4.8	5.2	8.6	8.1
2	7.0	7.2	5.5	7.0	6.2	8.0	8.8	6.2
3	6.1	5.8	5.4	8.6	9.3	6.2	6.5	5.9
4	4.0	7.2	10.3	5.4	4.9	7.0	4.5	5.2
5	4.6	7.6	6.5	8.9	7.7	8.2	7.3	8.6
6	7.8	8.7	5.5	7.9	3.8	6.7	6.3	8.4

ANSTELLWINKEL THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

60.0
27.4
0.599E-01 M**3/SEC

GRD
C
AUSTRITTSDRUCK

85989.
52125.
N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 35

GESAMTD RUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	79617.	75818.	71952.	67910.	63911.	60272.	55012.	51498.
2	83736.	77034.	73418.	70715.	66880.	63114.	58439.	54378.
3	81812.	77144.	73827.	70299.	67340.	63144.	59534.	54462.
4	81820.	77731.	74578.	70977.	67596.	64021.	59619.	55302.
5	82234.	78687.	75433.	71556.	68636.	64748.	60798.	55827.
6	82447.	79489.	75512.	73027.	69638.	64995.	60856.	56232.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTD RUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	3.4	4.9	4.5	6.2	4.6	3.9	5.6	5.6
2	6.0	3.3	3.7	4.8	5.1	5.2	4.8	8.0
3	4.7	6.0	3.5	5.5	7.0	3.7	5.1	4.5
4	4.3	4.4	5.5	4.4	3.4	4.8	6.6	6.5
5	6.4	4.1	5.2	5.3	6.3	4.7	5.5	5.5
6	4.5	4.6	2.8	3.6	4.6	3.2	4.6	5.8

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	66710.	65478.	62386.	59565.	56594.	49575.	46370.	45239.
2	68873.	63795.	57735.	51803.	48239.	43865.	43865.	38388.
3	69017.	66589.	62010.	57631.	54697.	49832.	44539.	38352.
4	74583.	66690.	61949.	57877.	54411.	50007.	43847.	33856.
5	75557.	67358.	64077.	58996.	55535.	49521.	40932.	35382.
6	76079.	69186.	65432.	61230.	57640.	50989.	46608.	42190.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	4.9	5.3	4.6	5.2	3.2	5.9	6.2	4.0
2	5.1	4.6	6.0	4.3	4.2	4.8	3.0	4.9
3	5.7	5.7	5.0	6.4	5.5	3.8	4.6	4.7
4	4.7	4.7	7.2	6.0	4.9	6.4	4.7	5.6
5	5.9	6.2	5.3	5.3	5.0	3.0	3.9	4.5
6	6.6	5.6	5.5	6.3	5.5	4.9	5.6	4.4

ANSTEUERWINKEL THETA 60.0 GRD
MITTLERE TEMPERATUR 27.4 C
GESAMT-VOLUMENSTROM 0.725F-01 M**3/SFC

105625.
52408.

EINTRITTSDRUCK
AUSTRITTSDRUCK

GRD
C

105625.
52408.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 36

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	95955.	89042.	83299.	77480.	71211.	68276.	59656.	55117.
2	100014.	91253.	85211.	77683.	71647.	65067.	58019.	58785.
3	96527.	90040.	85437.	82394.	77270.	71838.	65470.	61587.
4	96488.	91179.	88441.	82826.	77597.	71793.	65644.	61527.
5	97129.	94265.	88900.	83114.	78418.	72928.	69020.	61704.
6	99249.	94508.	88567.	83798.	79589.	74730.	68024.	

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	4.4	4.5	4.2	3.0	3.9	5.0	5.0	3.8
2	3.2	4.6	3.5	2.3	2.7	3.5	4.7	4.4
3	3.7	3.4	4.2	4.5	3.0	5.1	5.2	4.7
4	4.8	3.9	4.1	3.7	3.3	5.4	4.3	2.4
5	4.6	3.8	3.5	3.9	4.3	3.5	3.3	4.2
6	4.0	3.2	2.8	4.1	3.8	2.6	2.6	3.9

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	77548.	73446.	70009.	64990.	60956.	53550.	47048.	45789.
2	79209.	69982.	68677.	61799.	56084.	49522.	43515.	34408.
3	79690.	73426.	67853.	63889.	58563.	52020.	43360.	34888.
4	84912.	74073.	70474.	63461.	58354.	51313.	42815.	30712.
5	87503.	77722.	72015.	64662.	59345.	50744.	40827.	31333.
6	89686.	79292.	74212.	67327.	62946.	55187.	47781.	41875.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	5.0	4.3	2.9	3.4	2.9	3.7	4.1	3.6
2	4.5	4.3	4.1	3.4	4.1	4.2	3.4	3.2
3	2.9	4.5	2.9	3.4	4.7	4.8	2.0	3.2
4	3.9	3.7	3.0	3.4	2.9	3.2	3.1	4.5
5	2.3	4.0	3.1	2.8	4.6	4.6	4.5	4.0
6	3.4	4.7	4.2	2.8	3.7	4.7	3.3	3.4

ANSTÜLLWINKEL THETA 60.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 27.2 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.923E-01 M**3/SEC
 EINTRITTSDRUCK 145073.
 AUSTRITTSDRUCK 51333.
 N/M**2 N/M**2
 MESSREIHE 38

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	125435.	113950.	105586.	96871.	87977.	79206.	67383.	61094.
2	130287.	119007.	110092.	103819.	95145.	86484.	76738.	66119.
3	126689.	117688.	110149.	102412.	95591.	87091.	78954.	67533.
4	126215.	117802.	111999.	103687.	96765.	88217.	78458.	68130.
5	126566.	121495.	113447.	105358.	98781.	88058.*	69737.	80829.
6	128759.	121708.	113816.	107393.	100807.	89879.	80379.	71501.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	5.1	2.7	3.4	1.7	1.8	1.8	2.7	1.6
2	2.0	1.4	2.2	2.1	2.0	2.1	2.5	2.2
3	1.9	3.1	2.6	2.9	2.0	1.6	2.0	2.8
4	2.7	3.6	2.4	2.1	2.6	2.2	2.1	4.0
5	2.2	1.6	3.5	1.9	2.3	123.3.*	1.7	2.4
6	2.1	2.4	3.1	1.6	2.1	3.2	1.4	2.1

*) Meßstelle defekt

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	93656.	88282.	83976.	75881.	70087.	55992.	44908.	45408.
2	97037.	82930.	81380.	71244.	59742.	49280.	41004.	25476.
3	99560.	88068.	80505.	72033.	64022.	55049.	41018.	27252.
4	107179.	90427.	83082.	71676.	65511.	54146.	41280.	18329.
5	111490.	94429.	86401.	75798.	67548.	53740.	35290.	19950.
6	115070.	97943.	90533.	80899.	73804.	58629.	48189.	36871.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1	STAB 2	STAB 3	STAB 4	STAB 5	STAB 6	STAB 7	STAB 8
1	1.9	3.0	2.4	2.3	1.4	1.7	2.5	2.1
2	2.1	2.9	2.0	2.6	2.4	2.4	2.0	2.2
3	2.2	3.7	3.8	2.0	2.7	2.6	3.4	3.1
4	3.0	2.8	1.6	1.6	1.7	3.2	2.0	2.6
5	2.4	2.2	2.1	1.6	2.5	3.2	3.2	2.9
6	3.0	1.6	2.5	1.6	2.6	3.1	2.1	2.7

ANSTELLWINKEL THETA	45.0	GRD	EINTRITTSDRUCK	61209.	N/M**2
MITTLERE TEMPERATUR	27.8	C	AUSTRITTSDRUCK	55828.	N/M**2
GESAMT-VOLUMENSTROM	0.387E-01	M**3/SEC			

MESSREIHE 43

GESAMTDROCK		IN N/M**2		- MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -	
	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A
1	60008.	60388.	58022.	58086.	56741.
2	60809.	61027.	59382.	59424.	58008.
3	61348.	61184.	59501.	59667.	58265.
4	61081.	61340.	59891.	59979.	58772.
5	61652.	62256.	60317.	60313.	59307.
6	62180.	62823.	60730.	60733.	59433.
	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B		
	57113.	54754.	55134.		
	57889.	56546.	56229.		
	58452.	55893.	56829.		
	58406.	56675.	56993.		
	58857.	57247.	56652.		
	59466.	57621.	57926.		

STREUUNG DER MESSWERTE		IN PROZENT VOM GESAMTDROCK	
	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A
1	6.4	10.6	6.8
2	4.1	6.6	7.5
3	8.5	6.3	6.2
4	7.7	5.2	7.4
5	5.7	5.6	6.7
6	7.4	9.9	6.3
	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
	9.7	7.6	5.1
	6.3	5.1	7.8
	5.7	6.2	6.1
	9.4	5.7	4.8
	8.1	4.3	6.4
	6.5	7.0	5.8
	STAB 4A	STAB 4B	
	7.6	5.1	
	6.2	8.4	
	6.1	7.6	
	5.6	7.3	
	6.1	7.3	
	7.0	7.2	

STATISCHER DRUCK		IN N/M**2		- MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -	
	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A
1	57622.	57333.	56119.	55986.	54874.
2	56913.	56942.	55700.	55720.	54284.
3	57086.	57325.	55903.	55173.	54166.
4	57613.	57632.	55872.	55403.	54296.
5	58200.	58035.	55606.	55973.	54880.
6	58708.	58629.	56690.	56958.	55442.
	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B		
	54533.	52641.	52943.		
	52872.	53442.	53442.		
	52429.	52654.	52654.		
	52243.	52266.	52266.		
	51946.	51810.	51810.		
	52173.	52943.	52943.		

STREUUNG DER MESSWERTE		IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK	
	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A
1	4.1	9.3	5.7
2	7.8	6.2	4.1
3	4.1	4.3	4.5
4	3.6	4.8	8.1
5	6.7	5.4	3.9
6	8.8	6.6	7.2
	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
	6.6	4.1	3.9
	5.4	9.4	6.8
	5.5	6.2	5.5
	8.9	3.5	6.3
	3.9	4.6	8.2
	6.4	5.5	5.6
	STAB 4A	STAB 4B	
	8.9	6.3	
	5.7	5.9	
	4.3	8.0	
	6.2	7.9	
	9.8	5.1	
	7.3		

ANSTELLWINKEL THETA 45.0 GRD
MITTLERE TEMPERATUR 27.8 C
GESAMT-VOLUMENSTROM 0.482E-01 M**3/SEC

61758. N/M**2
54843. N/M**2
MESSREIHE 44

GESAMTDROCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	59491.	60456.	56966.	57580.	55071.	55030.	53194.	52479.
2	61568.	61442.	59775.	59014.	56797.	57342.	54829.	55033.
3	61542.	62015.	59608.	58969.	57718.	58155.	54409.	55403.
4	62124.	62007.	59814.	60422.	57745.	58466.	55500.	55089.
5	62344.	62305.	60691.	60438.	59262.	58704.	55583.	56067.
6	62701.	64147.	60704.	62019.	59121.		57102.	56955.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDROCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	4.2	7.5	5.5	5.8	5.1	9.6	7.0	7.4
2	10.1	6.6	7.7	3.9	7.7	8.5	6.0	8.7
3	8.0	4.5	6.4	10.7	8.5	7.1	5.5	4.8
4	6.5	5.9	6.0	9.5	5.8	6.6	6.5	5.1
5	7.9	6.7	9.2	6.3	6.3	3.8	5.1	8.8
6	6.3	8.3	7.2	5.6	6.9		8.0	7.2

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	55995.	55889.	53843.	54502.	52209.	51256.	49859.	50003.
2	55518.	54717.	53705.	53366.	50296.	50428.	48516.	48888.
3	55258.	55853.	53861.	51942.	51173.	50230.	48815.	48275.
4	56591.	56049.	52769.	53543.	51333.	51314.	48530.	46966.
5	57084.	56237.	53891.	53726.	52430.	51514.	46956.	47967.
6	57455.	58087.	54921.	55208.	52917.	51093.	48917.	49345.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	7.1	5.0	5.1	6.1	5.4	6.9	6.4	3.9
2	7.5	4.8	5.3	4.8	5.2	6.8	4.4	7.8
3	6.4	4.0	7.1	5.5	4.7	7.7	5.8	6.5
4	8.8	3.8	6.0	5.4	6.8	5.1	5.8	6.8
5	7.2	6.0	7.8	5.4	8.0	6.7	7.0	4.8
6	5.5	6.3	5.2	6.3	5.0	4.4	5.1	5.7

ANSTELLWINKEL THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

45.0
27.1
0.608E-01 M**3/SEC

GRD
C

EINTRITTSDRUCK
AUSTRITTSDRUCK

62025.
51765.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 45

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	59510.	60508.	55530.	56203.	51961.	52779.	48788.	49365.
2	61738.	62725.	59467.	58588.	55524.	55398.	52529.	52052.
3	62751.	63072.	59322.	58809.	56234.	56424.	51099.	53192.
4	62426.	62799.	59582.	60364.	57182.	56876.	53168.	53037.
5	63167.	64268.	60658.	61152.	59019.	57898.	54070.	53682.
6	64349.	66125.	61800.	62688.	58635.	58610.	55128.	56063.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	5.6	4.5	4.2	5.6	3.8	6.8	4.1	7.9
2	5.1	6.5	8.0	8.1	5.4	5.6	6.6	8.7
3	6.2	3.9	3.8	5.0	6.8	7.6	6.7	4.9
4	9.0	4.1	7.2	4.5	8.2	4.9	4.4	3.9
5	7.7	5.3	7.5	6.0	7.4	5.1	5.0	5.2
6	5.0	4.9	3.9	6.1	4.1	6.0	6.3	5.7

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	53124.	52266.	50896.	50549.	47784.	46624.	43719.	44853.
2	51741.	51697.	49259.	48774.	44735.	43455.	42406.	41199.
3	52374.	52870.	49434.	47151.	44956.	45008.	42009.	41049.
4	53546.	53317.	48411.	48193.	46672.	46131.	41467.	38904.
5	54726.	53681.	49077.	50486.	47457.	45988.	39516.	39860.
6	55622.	56523.	52433.	52395.	48819.	45377.	41884.	44347.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	4.1	4.8	4.7	5.2	4.2	4.4	3.8	5.1
2	7.3	5.6	4.7	6.4	6.8	4.5	5.3	5.7
3	6.3	4.6	5.2	6.0	6.8	2.9	4.8	5.0
4	4.2	4.6	5.0	8.1	5.3	6.0	4.1	5.1
5	4.7	5.7	5.8	5.6	6.7	4.8	5.8	4.3
6	5.3	3.3	5.3	4.7	3.8	6.1	5.1	6.9

ANSTELLWINKEL THETA 45.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 28.3 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.734E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
 AUSTRITTSDRUCK

74957.
 52039.

N/M**2
 N/M**2

MESSREIHE 46

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	69031.	69531.	59552.	61215.	55575.	58972.	53571.	51799.
2	71787.	70237.	66081.	65163.	63408.	63157.	55886.	55209.
3	69547.	70734.	66223.	67942.	64452.	61419.	53914.	57604.
4	69935.	71069.	69284.	69594.	62264.	62512.	57491.	59995.
5	72112.	75323.	70146.	67859.	65437.	64273.	61329.	60685.
6	76234.	77879.	68950.	70467.	65728.	68121.	62546.	60813.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	3.2	3.8	3.1	3.1	3.8	3.7	5.3	3.3
2	4.7	5.3	3.4	3.9	3.0	3.4	3.9	3.5
3	4.0	4.2	2.9	2.9	4.7	3.2	2.8	3.2
4	3.5	3.9	4.3	5.0	3.6	3.3	2.8	3.4
5	6.3	3.8	2.8	3.8	3.7	4.1	5.9	4.4
6	4.6	3.8	3.6	4.2	3.2	3.5	5.3	4.2

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	59072.	58143.	53145.	53450.	49740.	50821.	46373.	45914.
2	55917.	53768.	50364.	50853.	46979.	45068.	40757.	40924.
3	54412.	55830.	51545.	51355.	46886.	44350.	40061.	39193.
4	56989.	56908.	52708.	51935.	47051.	46098.	40101.	39357.
5	59470.	60781.	53137.	52584.	48559.	47278.	40342.	40111.
6	64614.	64065.	56190.	55723.	51135.	50309.	43490.	44404.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	4.3	3.5	3.3	3.0	4.8	3.4	5.0	3.6
2	4.0	3.5	3.0	3.4	3.4	4.1	3.5	4.3
3	3.0	3.7	3.7	3.7	4.2	3.8	5.0	3.7
4	4.6	5.1	2.6	3.6	3.4	2.2	1.8	5.0
5	3.6	5.7	2.9	4.0	2.2	2.3	2.3	3.5
6	4.0	3.6	2.7	3.5	4.0	3.5	3.1	2.7

ANSTELLWINKEL THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

45.0
27.5
0.845E-01 M**3/SEC

GRD
C
AUSTRITTSDRUCK

75059.
48334.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 47

GESAMTD RUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	48672.	68914.	57112.	59200.	50887.	55590.	48409.	47409.
2	72217.	71205.	65310.	64416.	61395.	60990.	53090.	51175.
3	70622.	71534.	65649.	67291.	62662.	59647.	49651.	54343.
4	70609.	71934.	69053.	69492.	61170.	60780.	54354.	57164.
5	73216.	72115.	70218.	68443.	64923.	63248.	58598.	57853.
6	78182.	80119.	69916.	71118.	64666.	67523.	60509.	59188.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTD RUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	5.2	4.5	3.1	3.0	2.4	2.8	3.9	2.9
2	2.9	2.5	3.7	3.0	4.2	4.9	3.0	3.4
3	3.1	3.4	4.1	3.9	3.4	2.4	3.8	4.1
4	3.0	3.5	2.9	4.1	4.4	3.2	3.4	3.6
5	3.0	4.6	4.8	3.5	4.6	3.5	2.8	2.3
6	3.8	3.0	3.4	2.3	4.0	4.7	4.2	3.1

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	55103.	54073.	48751.	48675.	43850.	44390.	39113.	39359.
2	51184.	49191.	44428.	44857.	39239.	36513.	32052.	31563.
3	50064.	51291.	45730.	44839.	38865.	37040.	30630.	29637.
4	52750.	52787.	46760.	46124.	40509.	38905.	30959.	28972.
5	56578.	56938.	47760.	47760.	41874.	40437.	30510.	30025.
6	62576.	61733.	52734.	51569.	45525.	44022.	34774.	36837.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	3.6	3.2	2.6	3.1	2.6	3.1	3.4	2.3
2	3.9	2.5	3.2	2.7	3.6	2.2	3.1	3.1
3	4.4	3.5	3.3	4.1	2.1	3.5	3.1	2.7
4	2.5	2.9	2.8	4.4	5.3	2.7	2.9	2.7
5	4.3	2.0	3.3	2.0	3.5	3.1	3.1	4.1
6	3.3	2.6	4.6	3.2	2.9	4.6	3.7	3.0

ANSTEUERWINKEL THETA 45.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 29.4 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.933E-01 M**3/SEC
 N/M**2 87338.
 N/M**2 54911.
 MESSREIHE 48

GESAMTDROCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -
 STAB 1A STAB 1B STAB 2A STAB 2B STAB 3A STAB 3B STAB 4A STAB 4B
 1 79628. 73702. 67909. 67616. 59574. 61841. 53981. 55839.
 2 82464. 84074. 76504. 75103. 68825. 69221. 62672. 59785.
 3 83146. 83679. 76790. 75660. 71458. 70643. 58056. 63262.
 4 82528. 83760. 78375. 79104. 72036. 71057. 63440. 62922.
 5 85302. 87838. 79927. 80515. 75976. 73489. 65033. 65442.
 6 89801. 91589. 82514. 83407. 75718. 75951. 68646. 69242.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDROCK
 STAB 1A STAB 1B STAB 2A STAB 2B STAB 3A STAB 3B STAB 4A STAB 4B
 1 5.3 3.0 2.2 2.7 2.7 2.6 3.2 3.9
 2 3.6 2.6 2.1 3.1 2.3 3.2 3.1 2.1
 3 2.3 2.9 2.9 2.8 2.4 2.3 2.8 1.8
 4 1.9 2.7 3.0 2.0 2.0 2.5 2.4 2.0
 5 2.9 2.6 2.2 2.9 2.2 1.8 2.3 1.6
 6 2.9 3.0 2.2 2.8 2.5 3.4 2.9 3.1

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -
 STAB 1A STAB 1B STAB 2A STAB 2B STAB 3A STAB 3B STAB 4A STAB 4B
 1 60641. 60774. 57560. 56220. 51068. 48518. 43775. 46103.
 2 56692. 57403. 51288. 51545. 41153. 40162. 37337. 36451.
 3 58540. 59247. 52989. 48418. 42099. 42942. 34361. 33393.
 4 61332. 61121. 50456. 51386. 46384. 44881. 34609. 29117.
 5 65548. 74473. 53485. 55688. 47971. 46274. 30757. 31852.
 6 69970. 70337. 62193. 59814. 53147. 46837. 37830. 42037.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK
 STAB 1A STAB 1B STAB 2A STAB 2B STAB 3A STAB 3B STAB 4A STAB 4B
 1 3.3 2.6 2.6 2.4 1.9 2.5 2.7 1.9
 2 3.2 1.9 2.2 2.0 2.8 2.1 3.1 2.0
 3 3.7 2.7 2.1 1.7 2.7 1.7 2.8 2.5
 4 2.8 2.4 2.9 3.3 2.2 2.4 3.0 2.5
 5 2.6 1.8 2.6 2.5 1.8 3.4 2.2 2.0
 6 2.1 2.7 2.1 2.4 2.0 2.3 1.3 1.9

ANSTELLWINKEL THETA 30.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 26.5 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.418E-01 M**3/SEC
 EINTRITTSDRUCK 60428. N/M**2
 AUSTRITTSDRUCK 56491. N/M**2

MESSREIHE 54

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	59779.	59572.	58867.	58362.	55508.	57585.	57176.	57347.
2	60892.	59815.	59456.	59042.	59038.	59147.	56551.	57872.
3	60113.	60391.	58602.	59787.	59126.	59084.	58513.	57006.
4	59419.	59803.	59306.	60141.	57539.	58659.	56303.	57168.
5	59662.	61795.	60427.	61180.	60099.	57537.	56313.	58764.
6	62096.	61955.	61304.	61528.	58704.	61044.	59805.	59855.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	14.8	12.9	15.2	15.7	11.9	16.6	14.3	14.4
2	23.8	11.5	9.9	12.4	14.1	17.3	11.3	13.8
3	10.6	16.5	16.6	18.1	14.1	13.4	14.3	16.6
4	14.1	14.1	14.9	13.7	12.1	17.7	10.4	15.2
5	20.7	14.6	16.8	14.0	17.1	15.4	19.6	20.9
6	14.9	18.5	13.2	15.5	14.6	13.9	16.9	9.0

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	54850.	54669.	55858.	55734.	54377.	55403.	55133.	55633.
2	54431.	53511.	54909.	53699.	53450.	54552.	54923.	54382.
3	56012.	55624.	53584.	55561.	54380.	54251.	54252.	53163.
4	57148.	56278.	55668.	55649.	54228.	54261.	51765.	52496.
5	58213.	59365.	58026.	58138.	55986.	54609.	52209.	52838.
6	61158.	60806.	60178.	59873.	57901.	59196.	57214.	57454.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	13.4	13.2	10.8	9.3	12.7	10.9	13.1	15.4
2	16.0	10.5	13.7	8.3	15.0	11.8	11.4	11.0
3	11.1	16.5	10.9	13.4	8.5	10.4	10.0	13.2
4	12.4	15.4	9.8	13.3	9.2	11.5	11.4	14.7
5	10.8	14.1	15.1	15.6	14.7	12.5	16.8	11.7
6	15.2	12.3	9.1	14.3	12.0	13.3	14.8	8.9

ANSTELLWINKEL THETA 30.0 GRD
 MITTLERE TEMPERATUR 27.3 C
 GESAMT-VOLUMENSTROM 0.566E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
 AUSTRITTSDRUCK

60666.
 55045.

N/M**2
 N/M**2

MESSREIHE 55

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	59527.	60325.	56989.	57651.	54098.	55195.	55788.	55060.
2	61242.	61937.	59703.	58503.	57967.	58824.	57330.	57260.
3	59844.	60500.	57965.	58896.	58857.	57901.	57533.	55846.
4	59244.	61203.	58260.	60739.	55516.	57657.	55263.	55846.
5	59884.	62371.	60700.	61225.	59176.	56754.	53886.	58027.
6	63079.	63279.	61321.	62156.	59357.	61075.	60077.	59829.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	17.7	15.0	15.0	9.0	9.0	8.6	12.2	12.1
2	17.7	8.6	9.9	10.8	14.0	13.3	11.7	10.1
3	9.0	10.7	12.3	7.2	12.4	9.9	10.7	10.6
4	11.1	10.2	13.7	9.9	8.6	13.7	8.5	10.1
5	13.8	12.9	12.2	10.5	12.5	9.0	10.8	10.0
6	10.6	16.7	11.3	9.6	8.7	17.8	9.5	9.8

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	51358.	52238.	53230.	53516.	52044.	52734.	53202.	52538.
2	51580.	52411.	51099.	50440.	50759.	51586.	51663.	51341.
3	53447.	54228.	51234.	52292.	51197.	50599.	51042.	49830.
4	55867.	54524.	52590.	53257.	50157.	51243.	47677.	48276.
5	57565.	58728.	56888.	56166.	53963.	52420.	47490.	49146.
6	61551.	61683.	59925.	59795.	57004.	58188.	56271.	55833.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	9.4	12.9	9.7	8.4	9.8	10.3	12.4	10.1
2	9.8	9.6	14.8	9.1	10.6	9.8	10.9	13.0
3	9.6	13.3	11.2	11.0	8.3	14.1	8.8	10.7
4	13.7	7.6	10.7	8.6	8.9	8.4	11.7	8.5
5	7.6	12.4	10.0	8.7	10.0	17.1	12.6	11.9
6	12.8	9.4	7.7	8.9	9.1	18.0	5.9	10.0

ANSTELLWINKEL THETA	30.0	GRD	EINTRITTSDRUCK	62224.	N/M**2
MITTLERE TEMPERATUR	25.6	C	AUSTRITTSDRUCK	56203.	N/M**2
GESAMT-VOLUMENSTROM	0.719E-01	M**3/SEC			

MESSREIHE 56

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -					
STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
1	59976.	61075.	57513.	54488.	54468.
2	61611.	64802.	61139.	60893.	57757.
3	61255.	62158.	59834.	58833.	57928.
4	60136.	63882.	58515.	61356.	55761.
5	63173.	64015.	61761.	63671.	60298.
6	65223.	65385.	63686.	64475.	61362.
					61976.
					60677.
					61183.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK					
STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
1	13.1	11.9	7.8	13.8	6.7
2	12.0	10.0	9.7	8.8	15.4
3	12.1	7.1	6.3	11.8	12.5
4	11.7	7.3	9.6	10.3	9.2
5	7.7	8.8	9.4	6.6	8.2
6	8.1	12.1	11.4	9.9	10.8
					14.1
					11.0
					9.8

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -					
STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
1	48601.	49668.	51775.	51885.	51741.
2	48899.	51470.	48817.	49324.	47998.
3	52085.	52921.	47981.	48969.	48351.
4	55116.	55253.	49855.	50488.	48040.
5	59083.	58729.	55809.	56371.	52129.
6	62694.	62676.	61315.	60585.	58653.
					57770.
					55377.
					55833.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK					
STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B
1	10.1	12.1	7.2	11.8	9.9
2	7.7	7.1	10.1	8.0	8.1
3	9.5	8.6	6.3	11.2	8.4
4	9.4	12.4	11.8	9.1	8.2
5	7.5	8.5	10.9	13.5	10.8
6	8.5	7.3	10.6	11.0	10.0
					8.5
					7.6
					9.1
					9.6

ANSTEUERWINKEL THETA
MITTLERE TEMPERATUR
GESAMT-VOLUMENSTROM

30.0
26.8
0.849E-01 M**3/SEC

EINTRITTSDRUCK
AUSTRITTSDRUCK

61617.
54228.

N/M**2
N/M**2

MESSREIHE 57

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	60118.	60718.	55147.	56237.	51606.	51539.	52254.	51103.
2	62131.	64692.	60630.	60551.	56302.	57923.	56031.	55458.
3	60372.	62428.	59288.	58594.	58067.	57140.	56120.	55473.
4	59463.	64911.	57120.	61602.	52095.	56700.	53685.	52752.
5	63441.	65062.	61730.	63457.	59683.	56827.	47789.	56894.
6	66232.	66212.	63823.	64944.	61609.	61958.	60534.	60261.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	13.3	10.2	7.9	10.5	7.9	10.8	9.4	9.5
2	9.4	7.0	10.3	9.4	9.3	12.8	10.7	8.1
3	9.1	9.6	9.1	8.1	6.0	11.1	8.1	7.5
4	8.6	7.0	10.3	14.2	7.2	11.6	9.2	8.7
5	11.3	14.5	8.9	9.5	9.0	9.2	11.3	11.6
6	6.9	9.3	8.8	6.2	7.1	9.3	12.1	10.0

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELWERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	43277.	46545.	46998.	47859.	47697.	46271.	46869.	47051.
2	43824.	47364.	43887.	44067.	43000.	43186.	44342.	44476.
3	47520.	49872.	45057.	44479.	42946.	42368.	42862.	43244.
4	52600.	52571.	45028.	45884.	41867.	42948.	38830.	37173.
5	58207.	57804.	53826.	53113.	48567.	47694.	36252.	38565.
6	63253.	63257.	61035.	60719.	57697.	56967.	53266.	53055.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	10.3	8.3	7.0	12.4	5.1	8.5	6.3	7.5
2	9.2	8.2	8.1	10.7	8.9	8.2	11.7	9.9
3	7.6	5.8	9.6	9.4	8.7	5.9	8.5	8.0
4	10.4	11.1	9.1	6.8	7.1	8.6	7.3	7.6
5	8.5	9.2	8.0	7.0	5.9	7.4	10.0	7.0
6	10.3	8.4	11.0	6.0	9.6	8.4	6.1	7.5

ANSTELLMINKEL THETA 30.0 GRD
MITTLERE TEMPERATUR 27.3 C
GESAMT-VOLUMENSTROM 0.951E-01 M**3/SEC
EINTRITTSDRUCK 61156.
AUSTRITTSDRUCK 52484.
N/M**2
MESSREIHE 58

GESAMTDRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	60052.	60618.	53162.	54429.	49100.	48997.	50083.	48395.
2	62760.	65962.	60452.	60425.	55117.	56894.	54601.	53914.
3	58839.	62298.	58467.	57945.	57189.	56092.	54828.	53801.
4	58241.	65580.	55172.	61492.	49252.	55722.	51377.	50505.
5	63642.	65785.	61773.	63689.	59290.	55578.	44144.	56266.
6	67329.	67118.	63908.	65935.	61471.	62199.	60300.	59798.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM GESAMTDRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	9.8	8.4	9.3	7.7	7.2	7.9	10.0	4.2
2	8.6	7.2	9.3	7.8	7.9	8.7	8.5	10.0
3	8.3	14.0	4.3	8.9	7.7	8.0	8.1	6.6
4	6.1	6.7	8.8	8.5	5.3	10.8	6.4	9.9
5	7.9	11.3	8.6	8.5	7.2	7.4	7.0	10.4
6	7.1	8.4	6.0	8.4	7.4	10.0	6.9	9.7

STATISCHER DRUCK IN N/M**2 - MITTELMERTE AUS 20 MESSUNGEN -

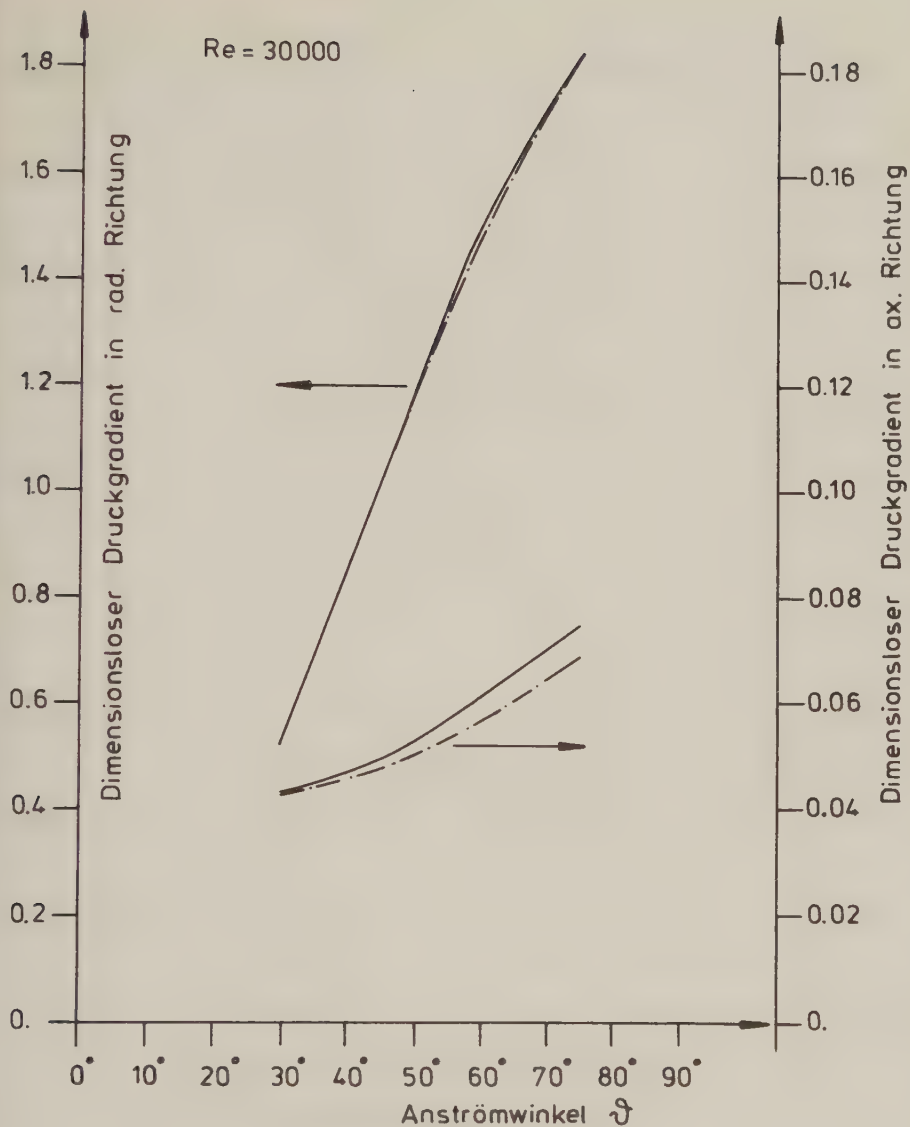
	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	38596.	43869.	42967.	44400.	44369.	42392.	43588.	43610.
2	39122.	44318.	38755.	39578.	38355.	38307.	40075.	40018.
3	44028.	47125.	40308.	40193.	37797.	37496.	38649.	38649.
4	50553.	50117.	41240.	42059.	36986.	38203.	32837.	30818.
5	57549.	57022.	52175.	51349.	45225.	44331.	30181.	32749.
6	63692.	63839.	61027.	60562.	56793.	56016.	51145.	51125.

STREUUNG DER MESSWERTE IN PROZENT VOM STATISCHEN DRUCK

	STAB 1A	STAB 1B	STAB 2A	STAB 2B	STAB 3A	STAB 3B	STAB 4A	STAB 4B
1	8.8	8.6	7.6	9.4	6.1	9.8	8.9	5.2
2	10.3	9.9	6.4	5.1	9.7	9.3	6.1	7.3
3	7.8	9.3	6.1	10.2	6.9	5.5	8.5	8.4
4	10.0	5.9	7.3	5.6	7.1	9.2	6.9	7.9
5	7.4	7.8	9.2	11.0	4.9	5.6	11.2	6.7
6	8.3	5.8	7.9	8.5	7.9	9.1	9.0	5.6

Anhang

Bilder



— Hollenhorst

- - - Boettgenbach

Stützstellen bei $\Delta\theta = 15^\circ$

Bild 1: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

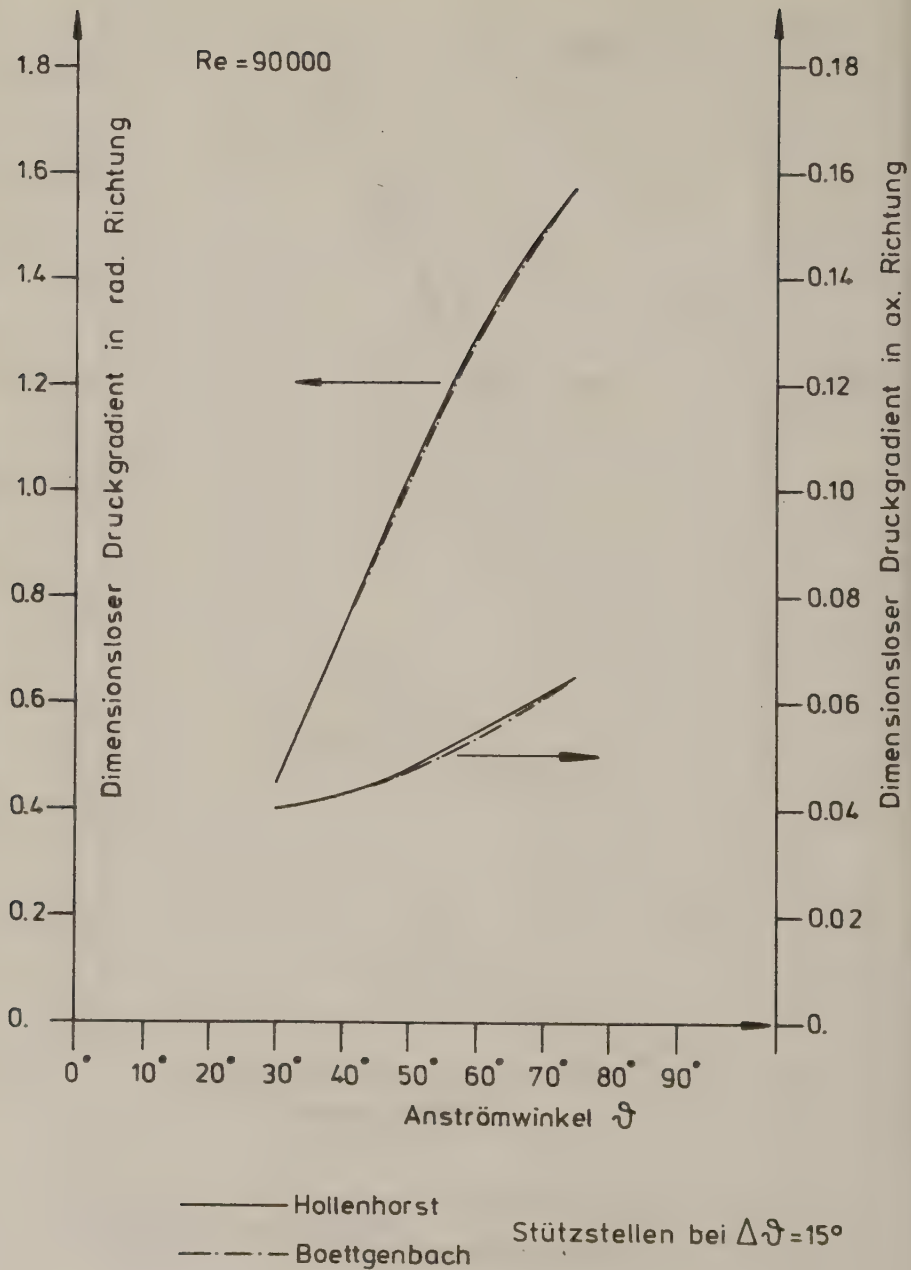


Bild 2: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

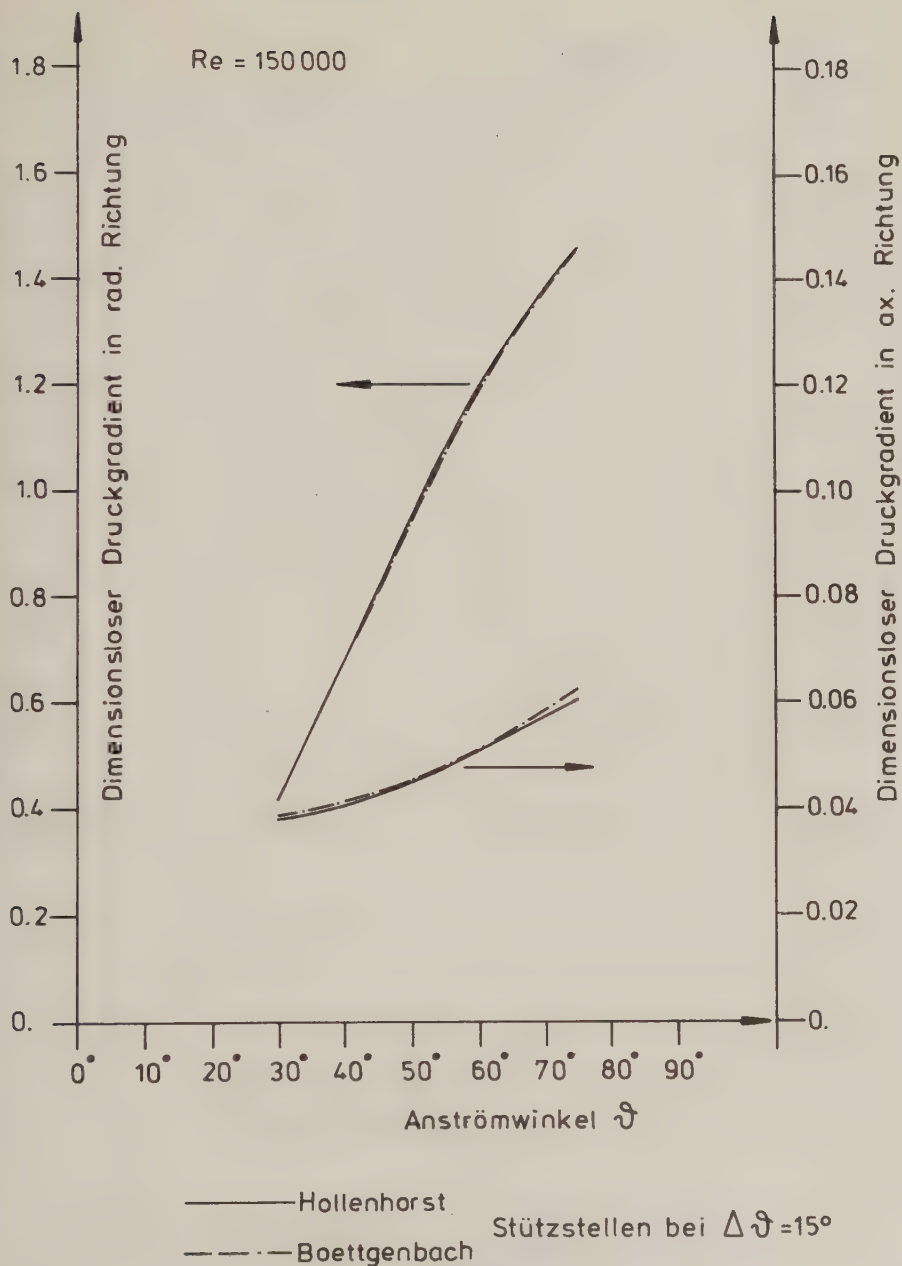


Bild 3 : Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

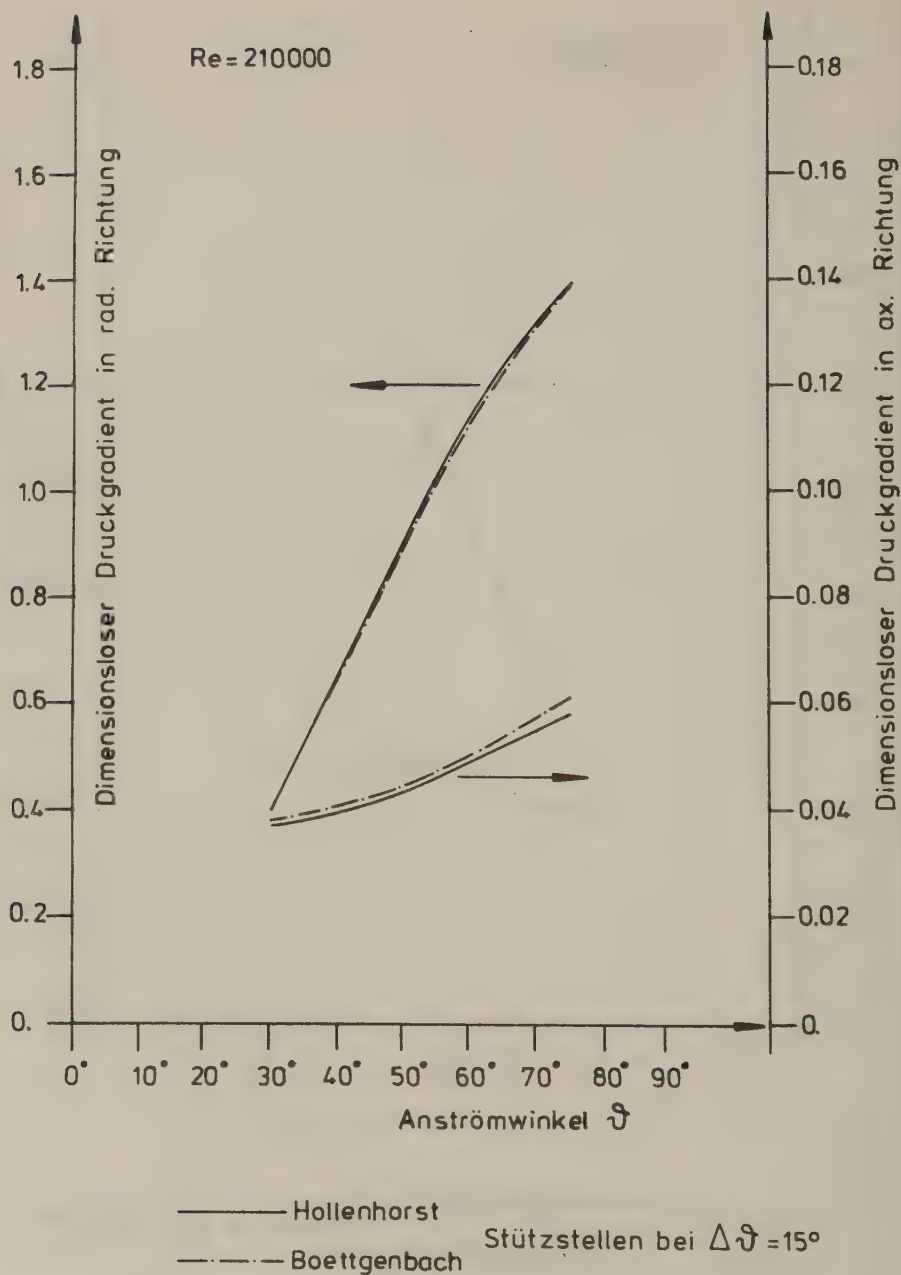


Bild 4: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

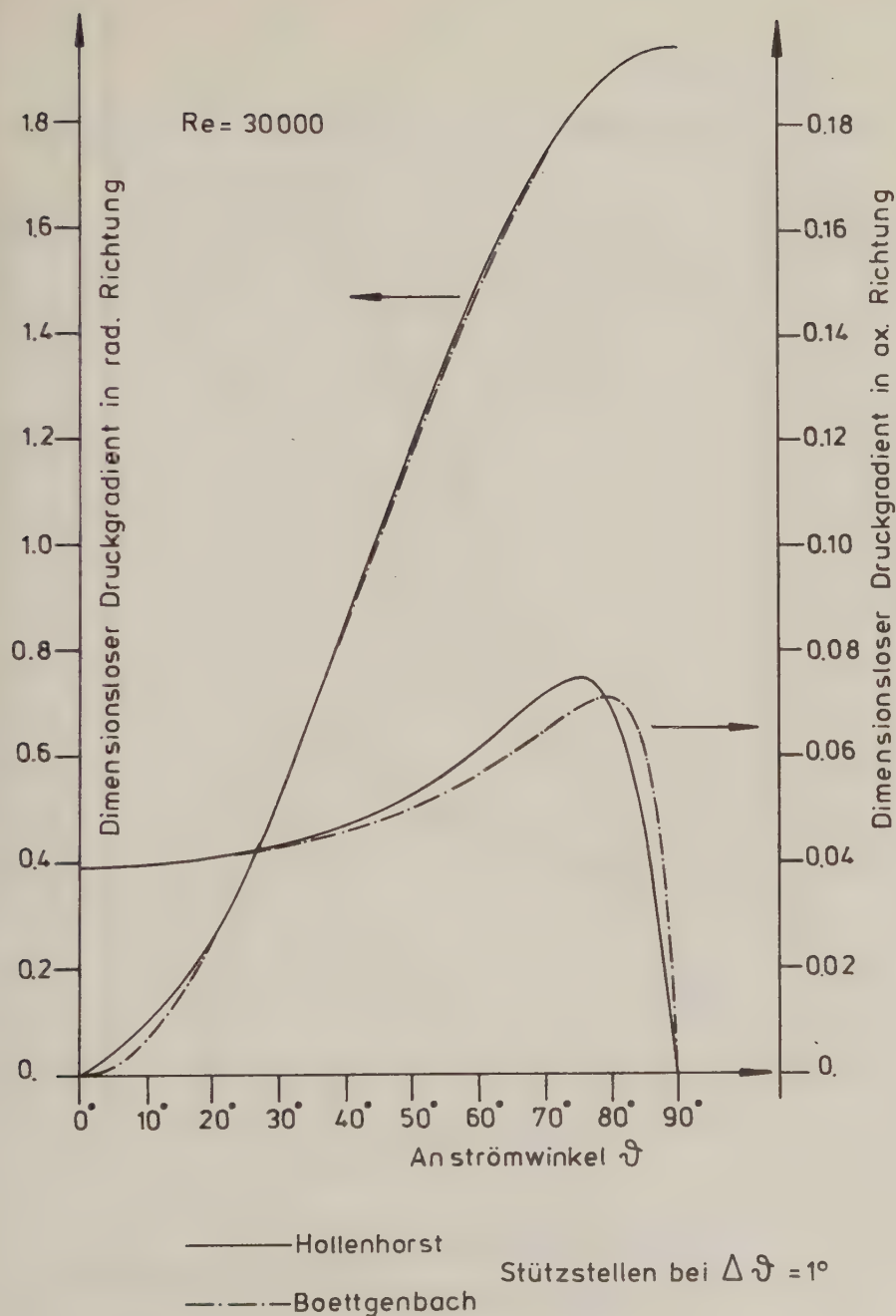


Bild 5: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

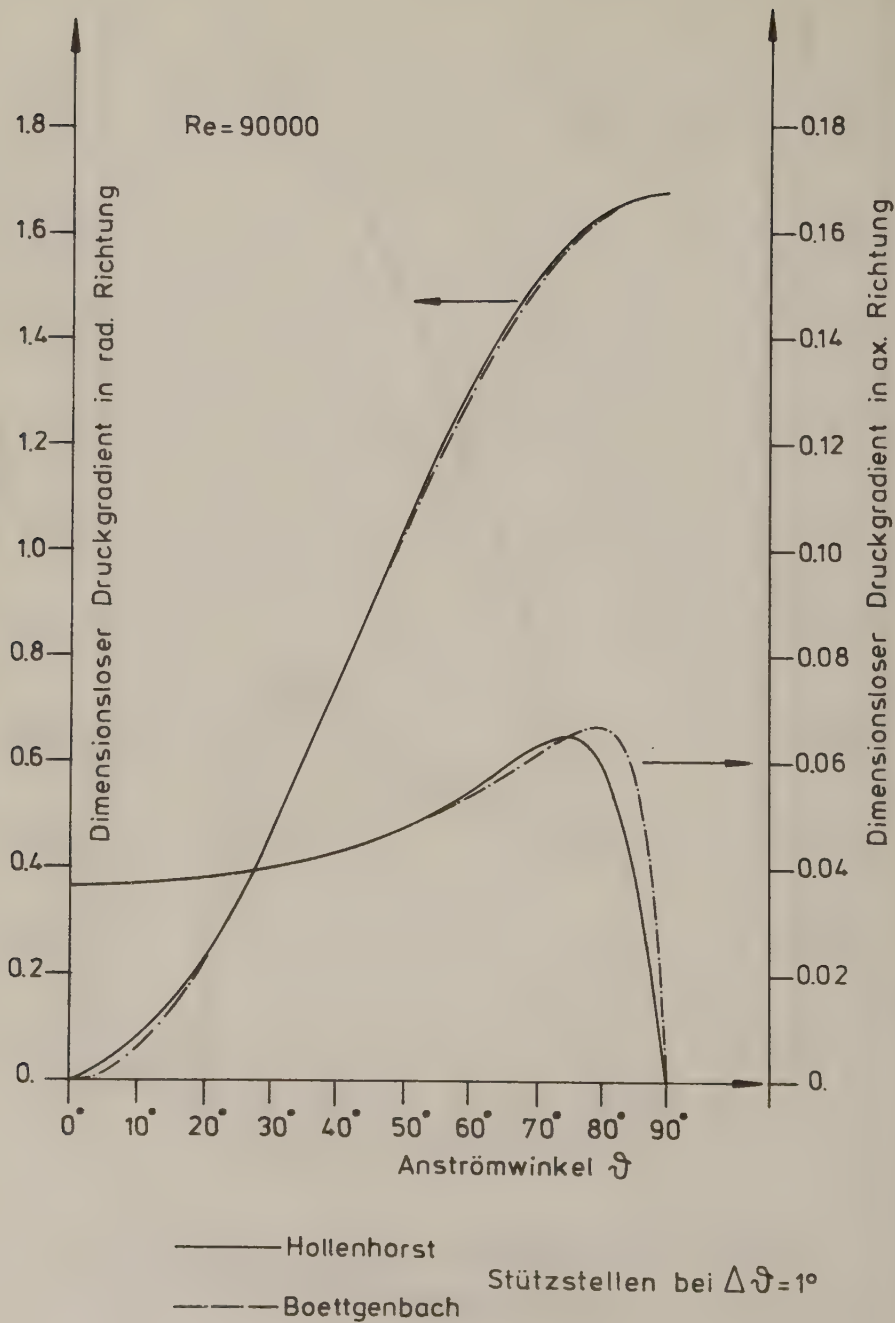


Bild 6: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

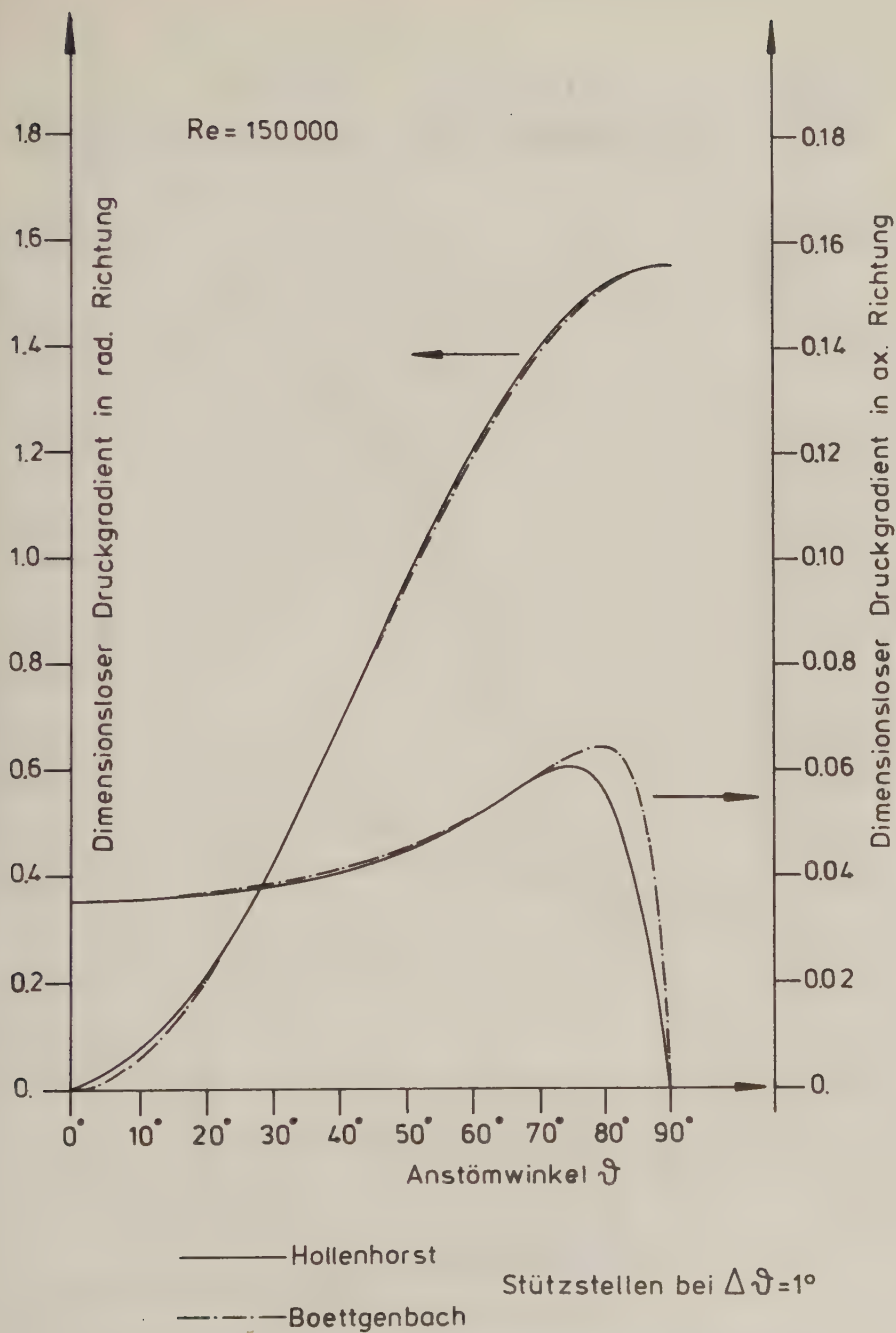


Bild 7: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

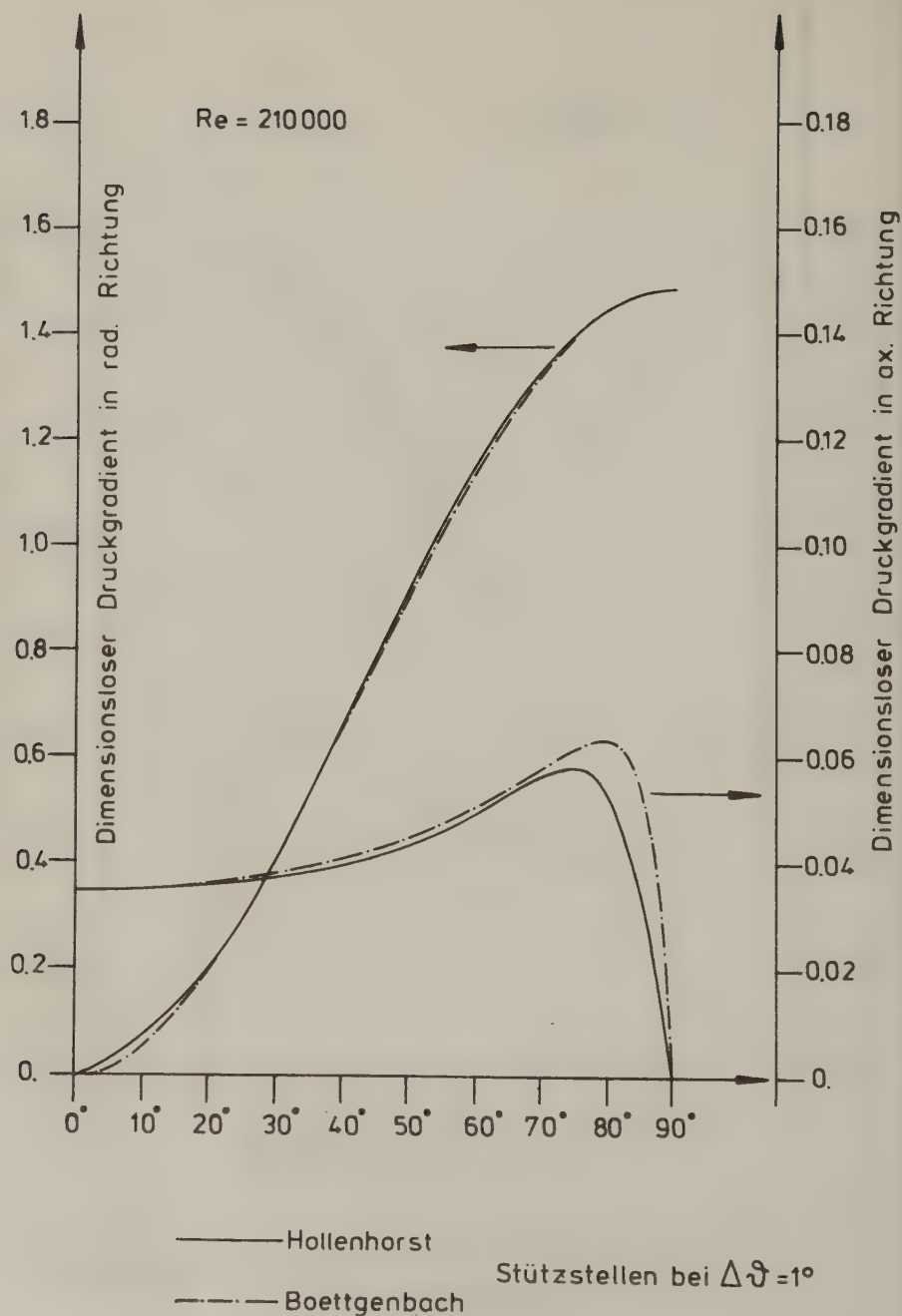


Bild 8: Vergleich der Darstellung von Druckgradienten

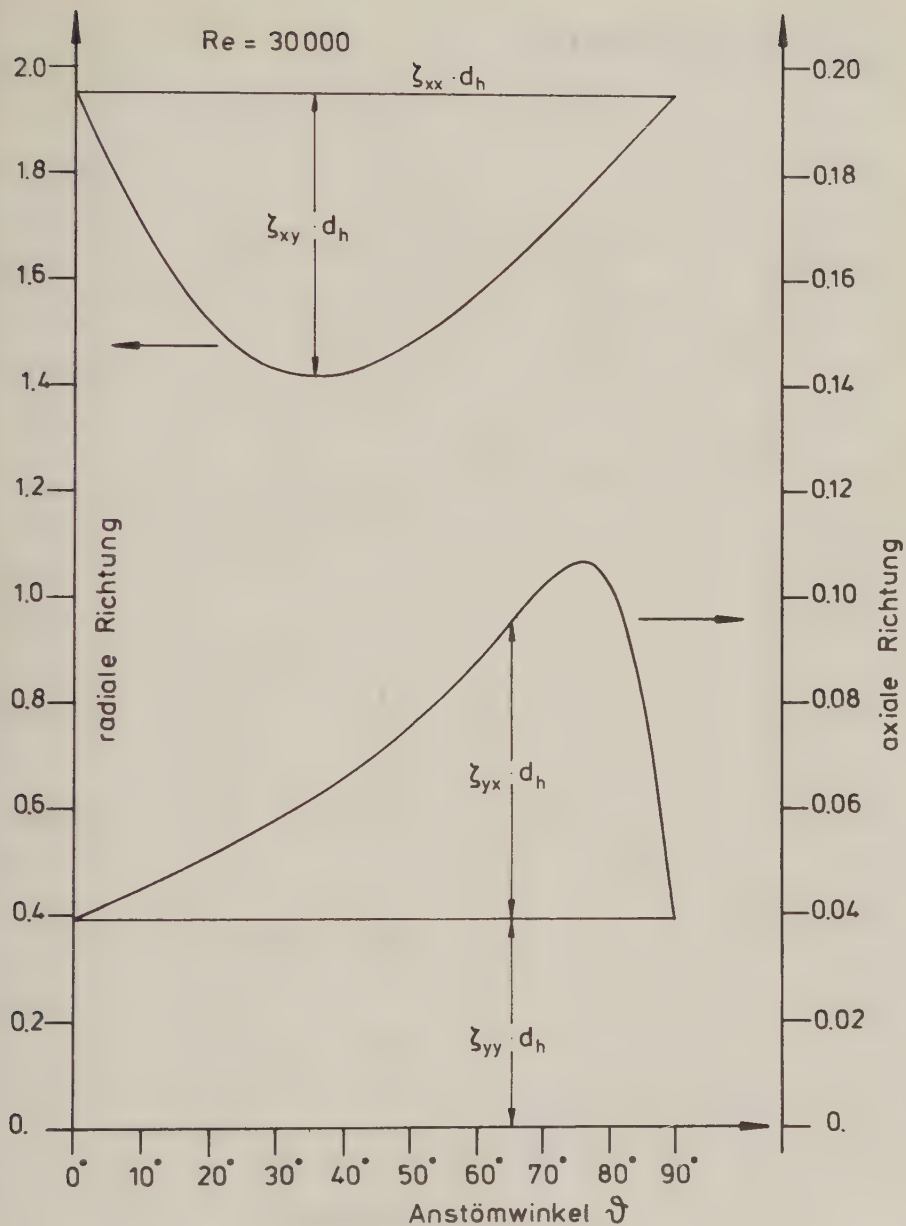


Bild 9 : Dimensionslose Matrixelemente nach Hollenhorst
für die Ergebnisse von Boettgenbach

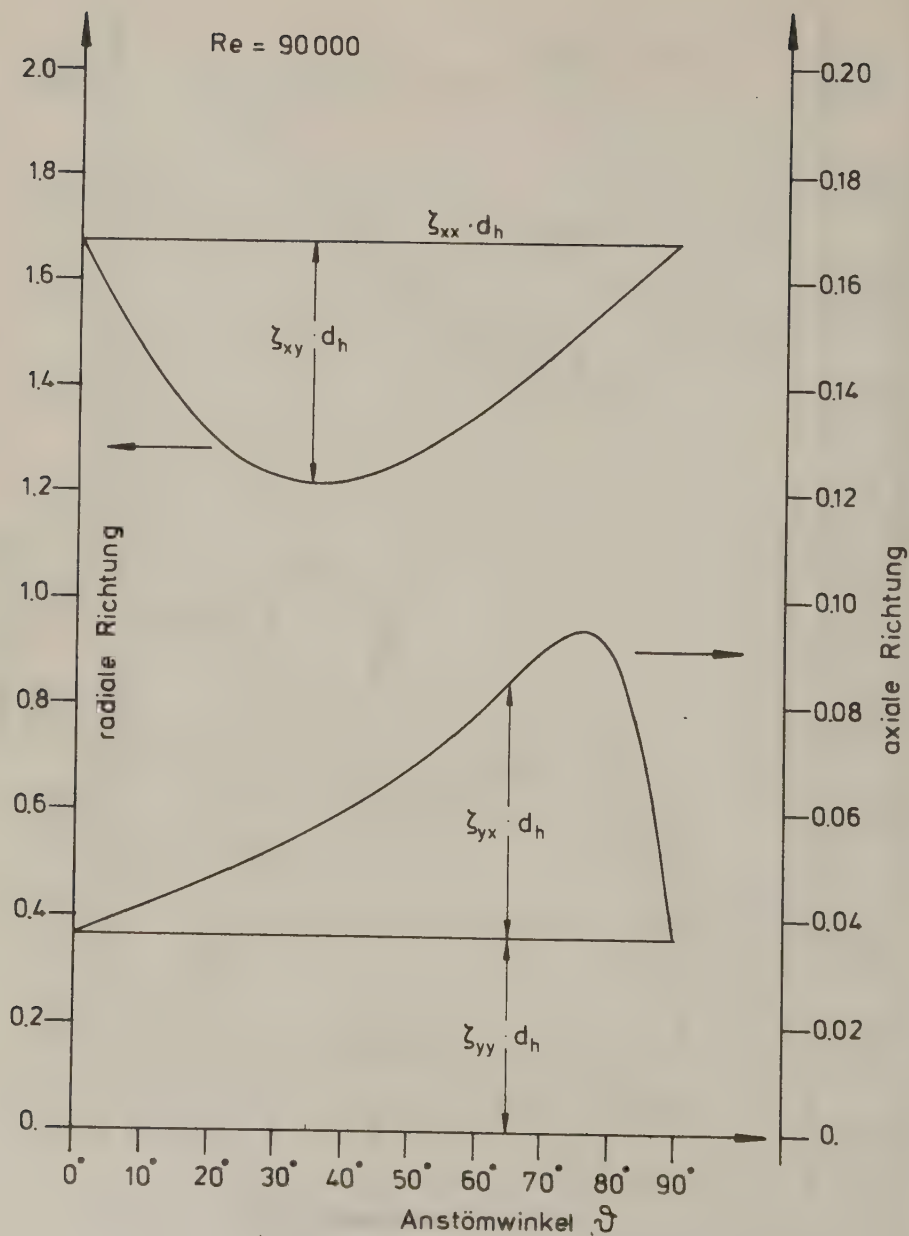


Bild 10 : Dimensionslose Matrixelemente nach Hollenhorst
für die Ergebnisse von Boettgenbach

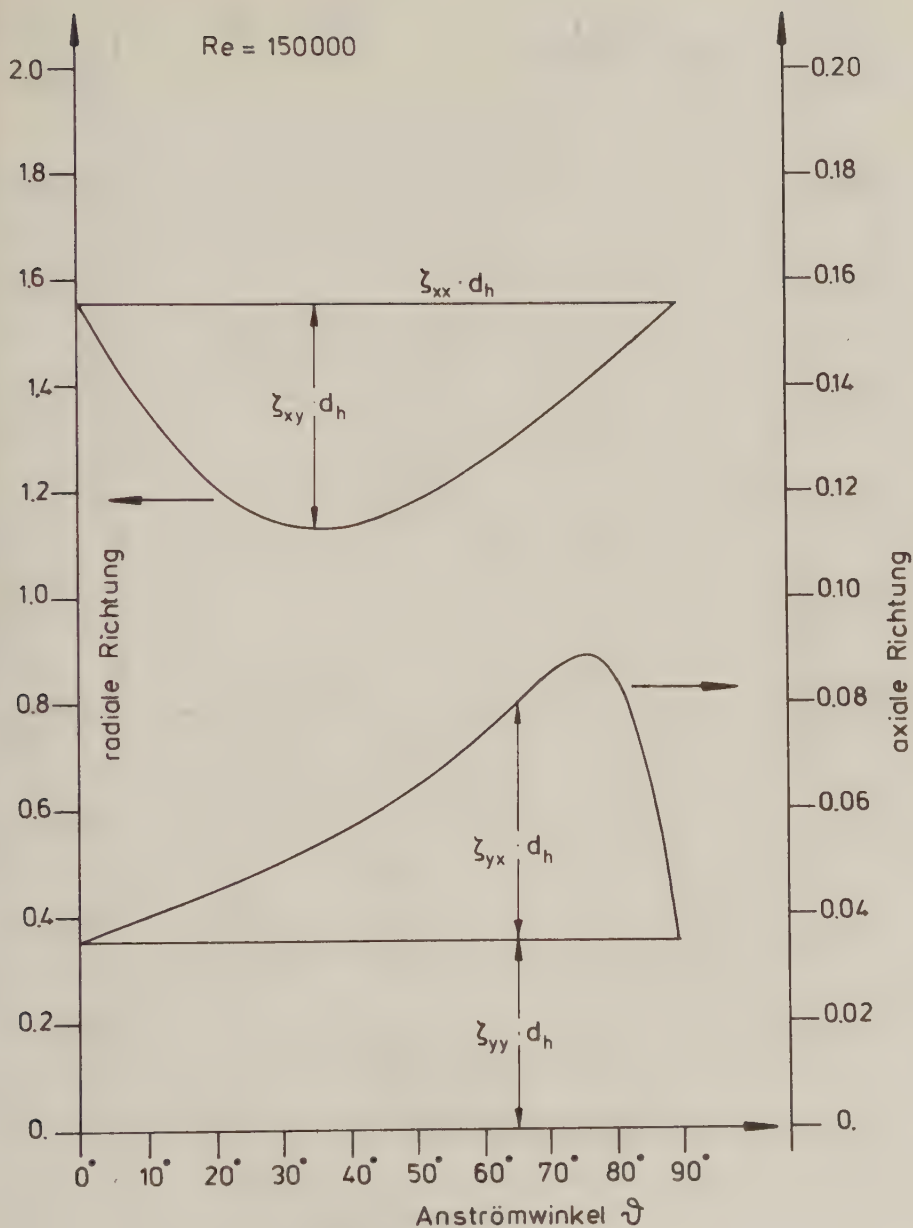


Bild 11 : Dimensionslose Matrixelemente nach Hollenhorst
für die Ergebnisse von Boettgenbach

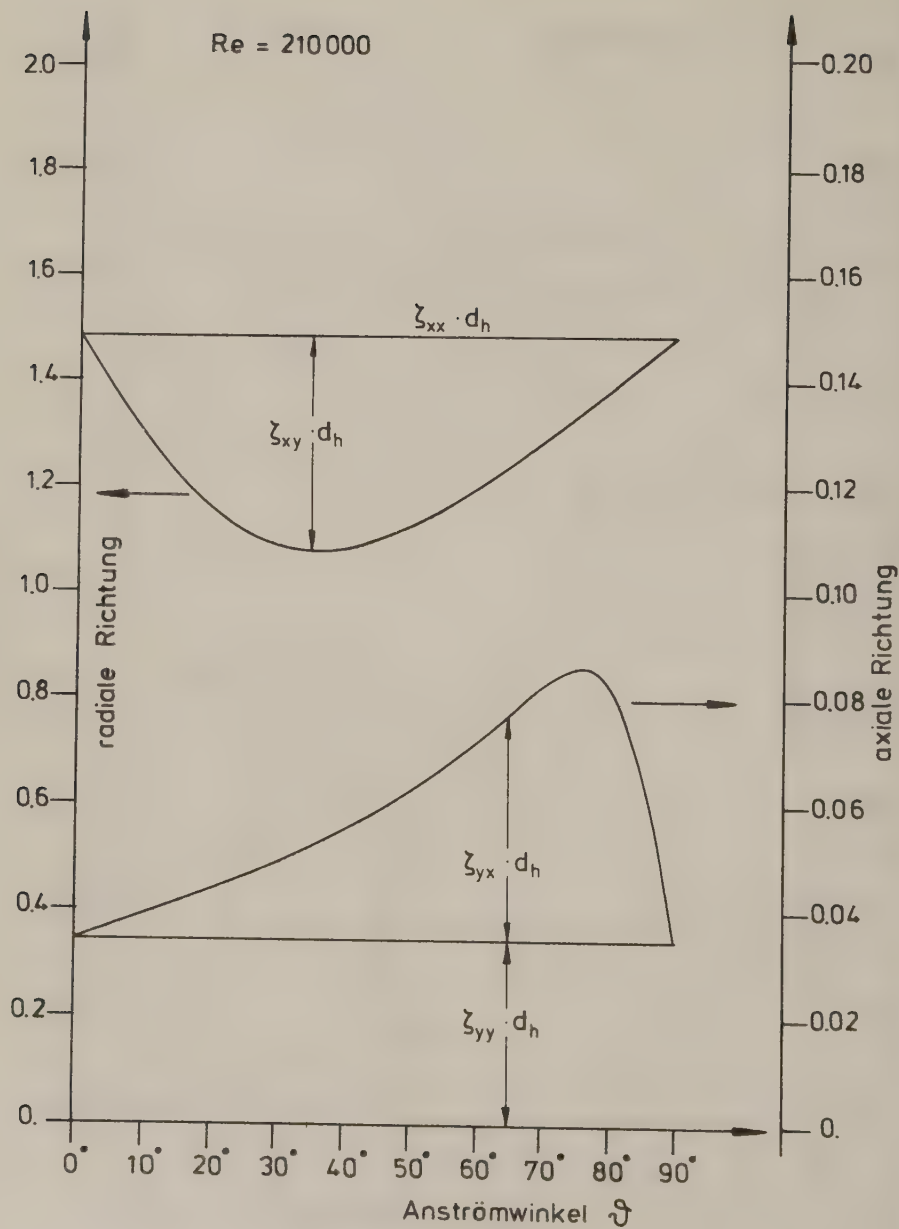


Bild 12 : Dimensionslose Matrixelemente nach Hollenhorst
für die Ergebnisse von Boettgenbach

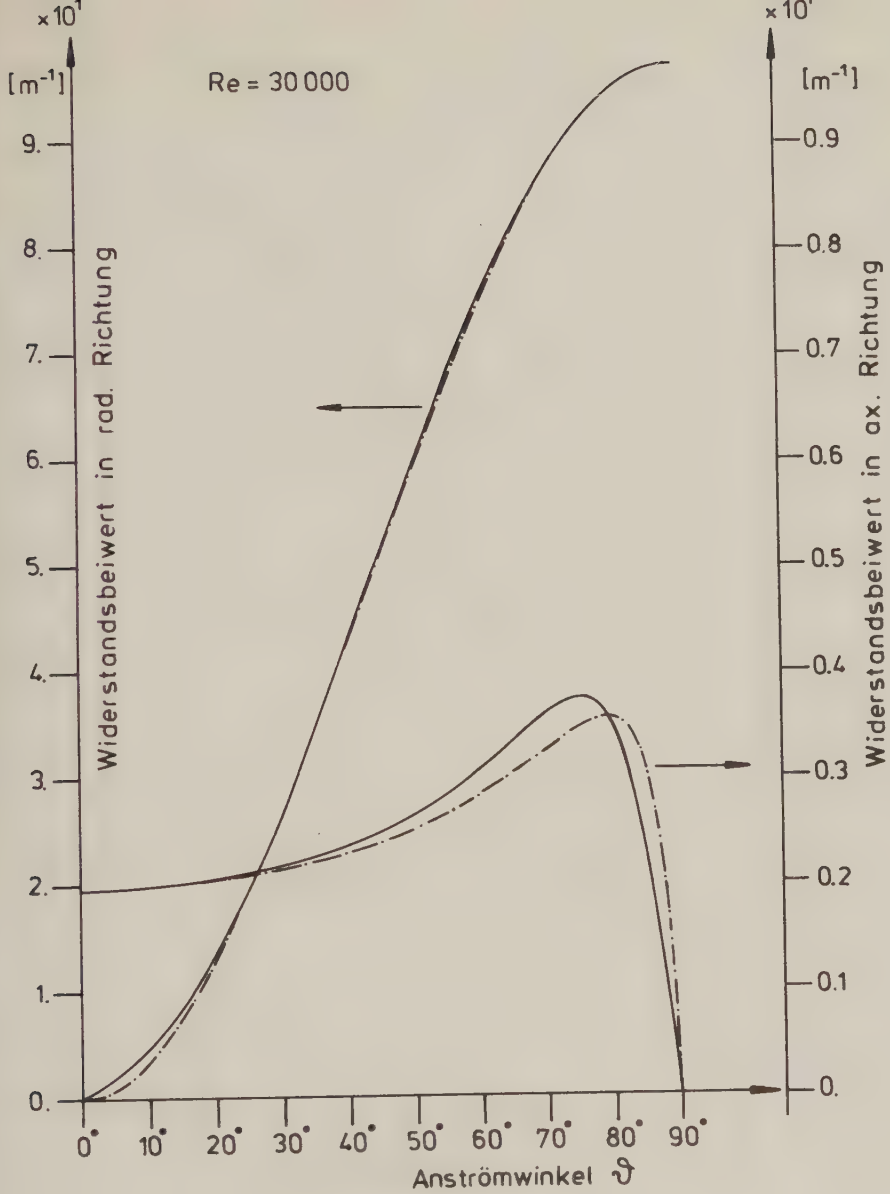


Bild 13: Widerstandsbeiwerte bzw. staudruckbezogene Gradienten

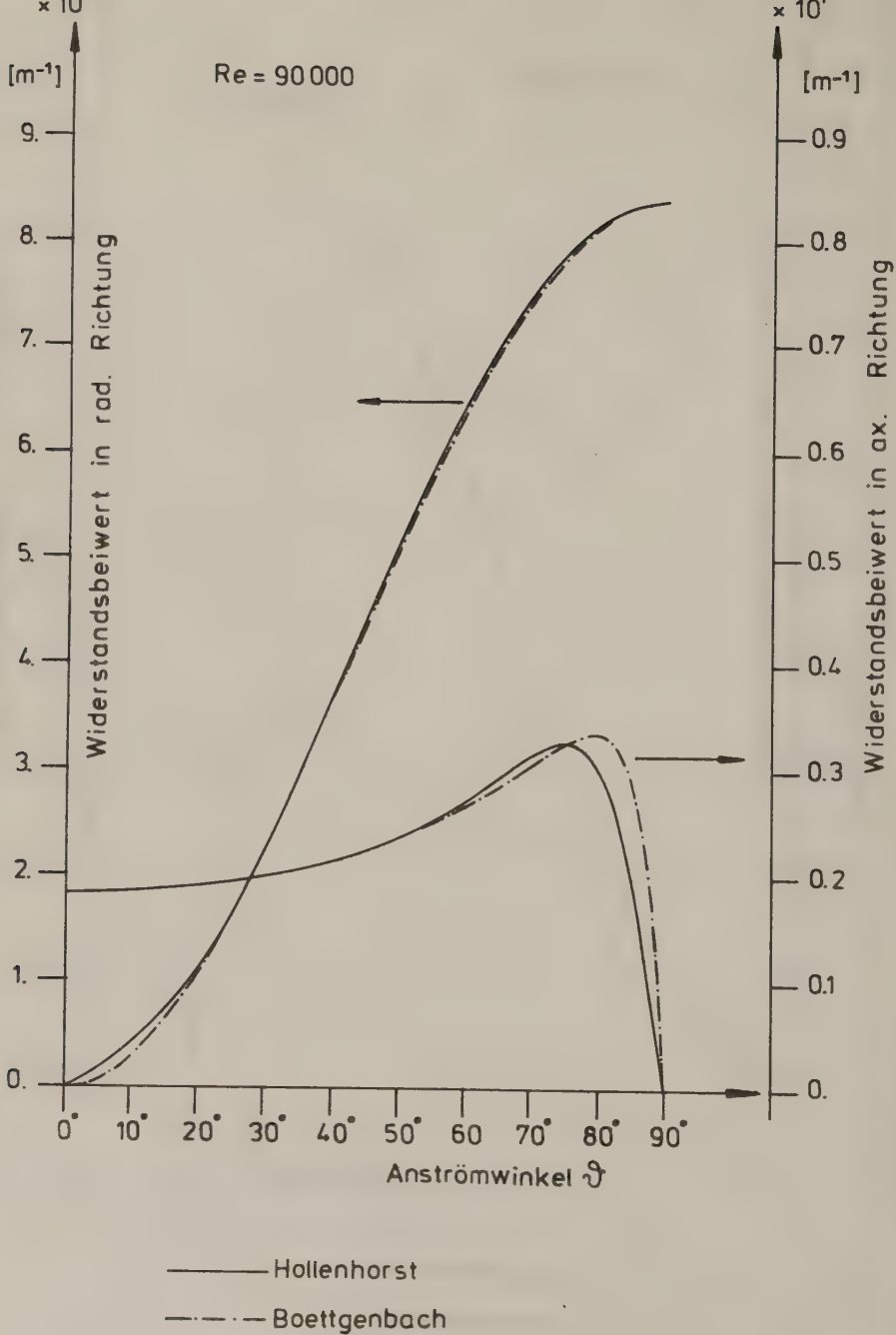


Bild 14: Widerstandsbeiwerte bzw.
staudruckbezogene Gradienten

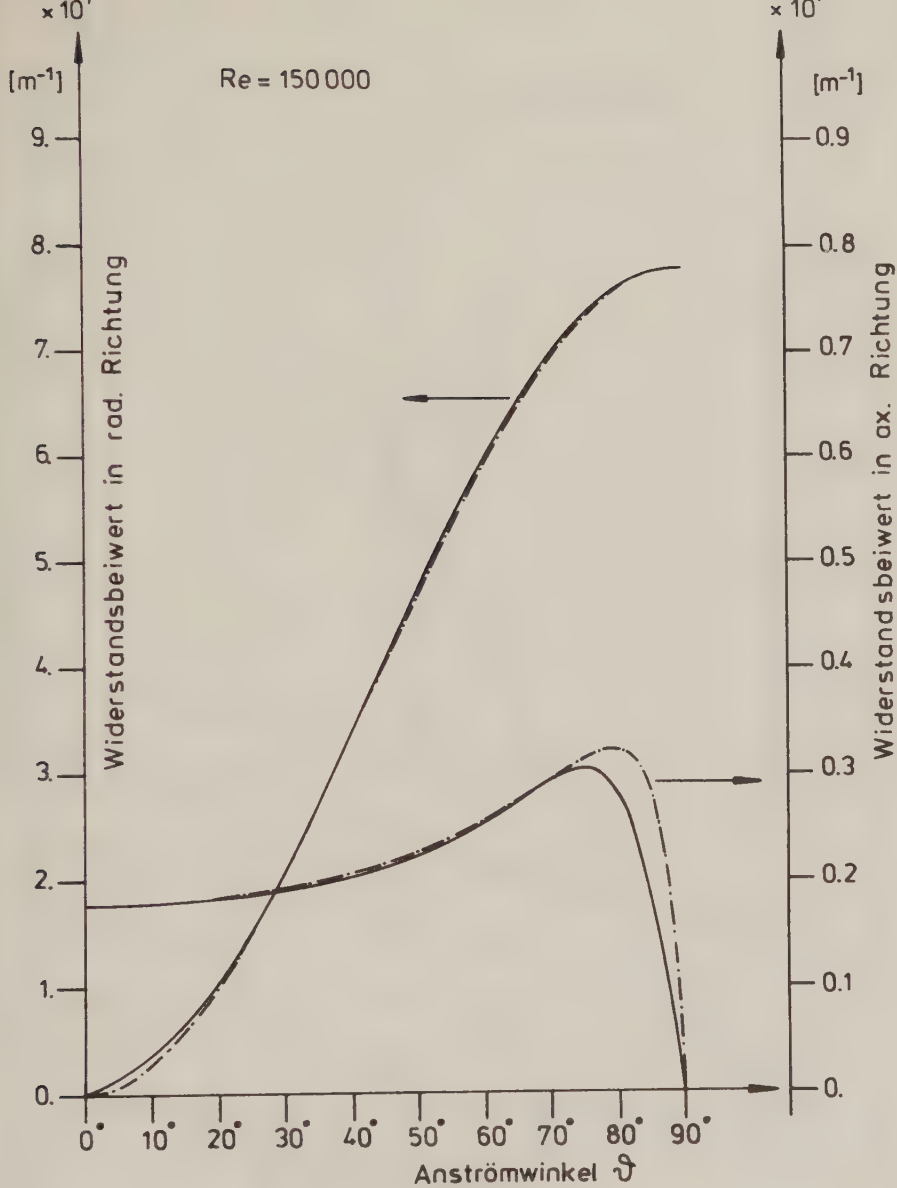


Bild 15: Widerstandsbeiwerte bzw. staudruckbezogene Gradienten

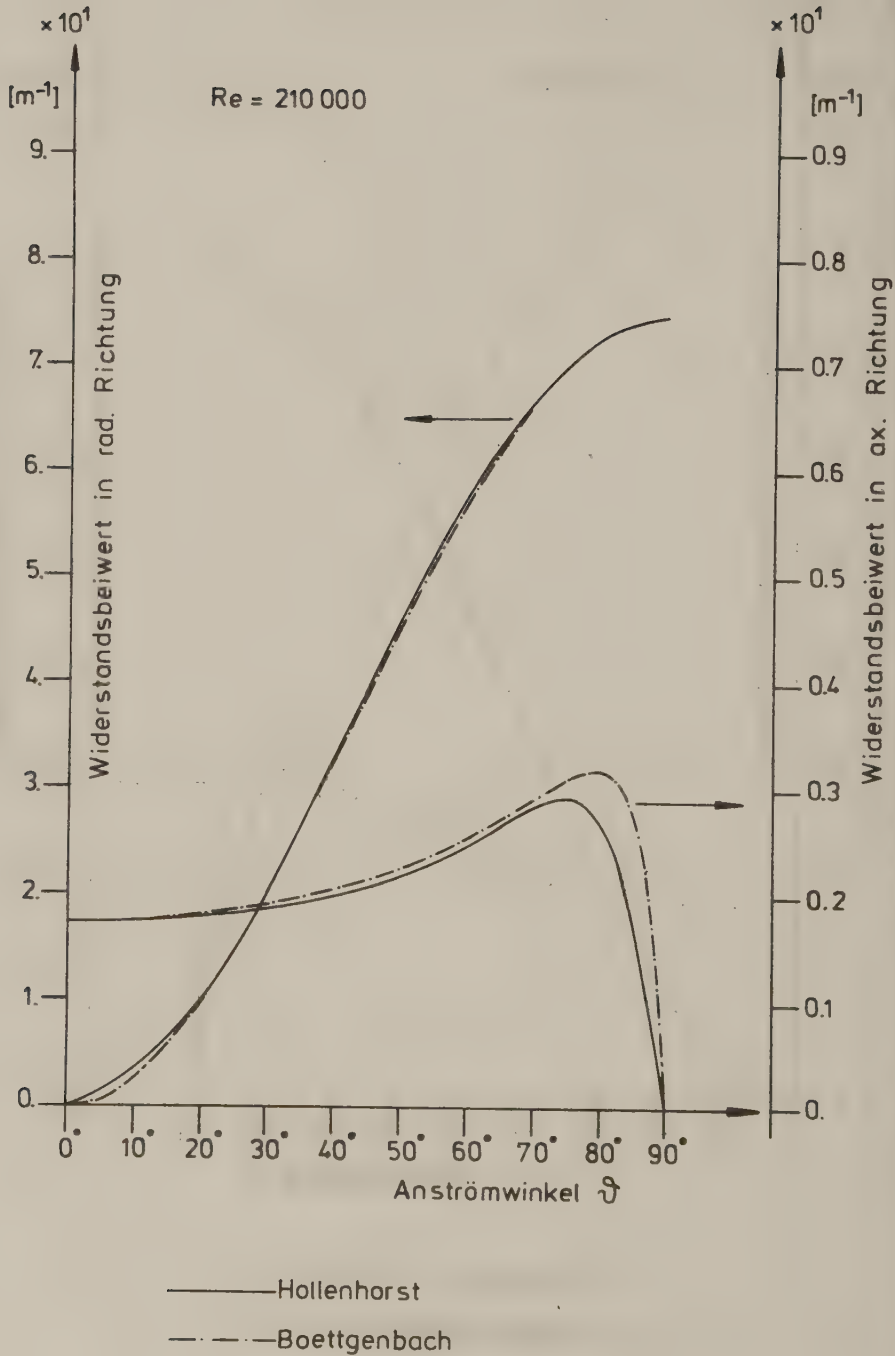


Bild 16: Widerstandsbeiwerte bzw.

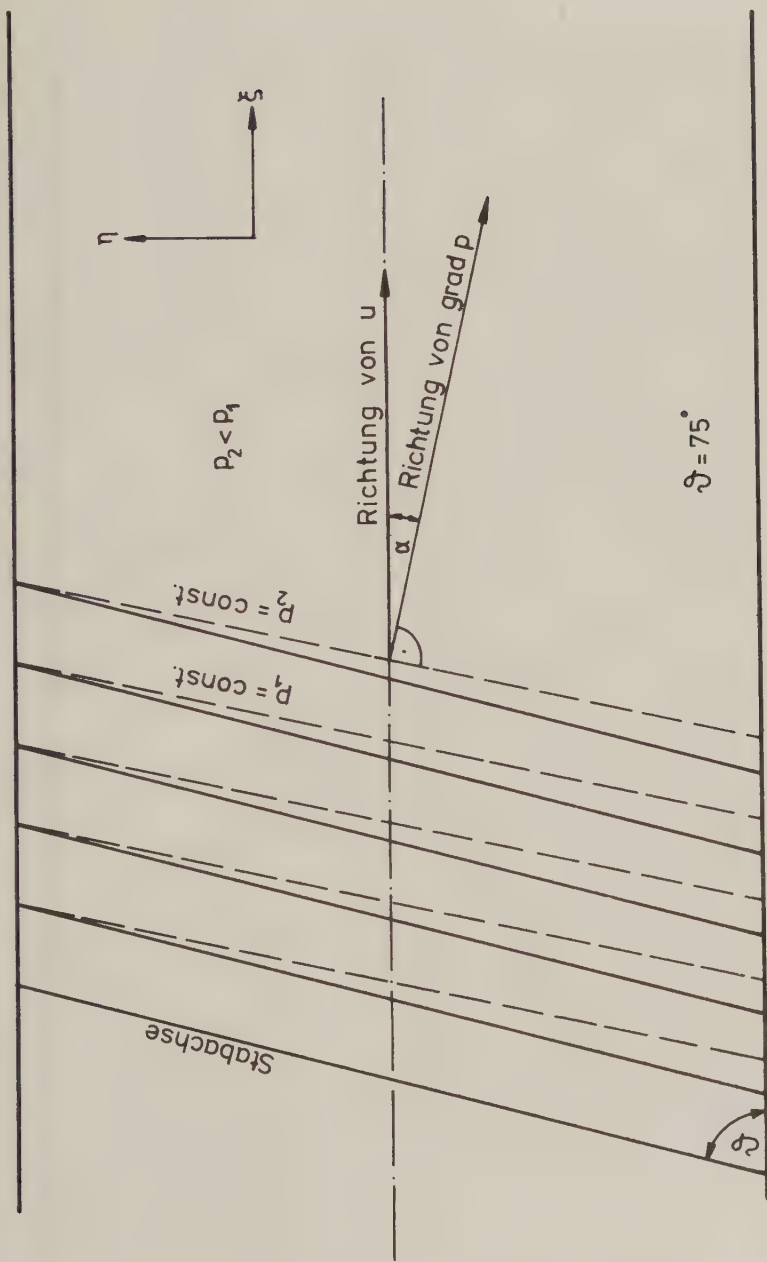


Bild 17 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Vierecksanordnung

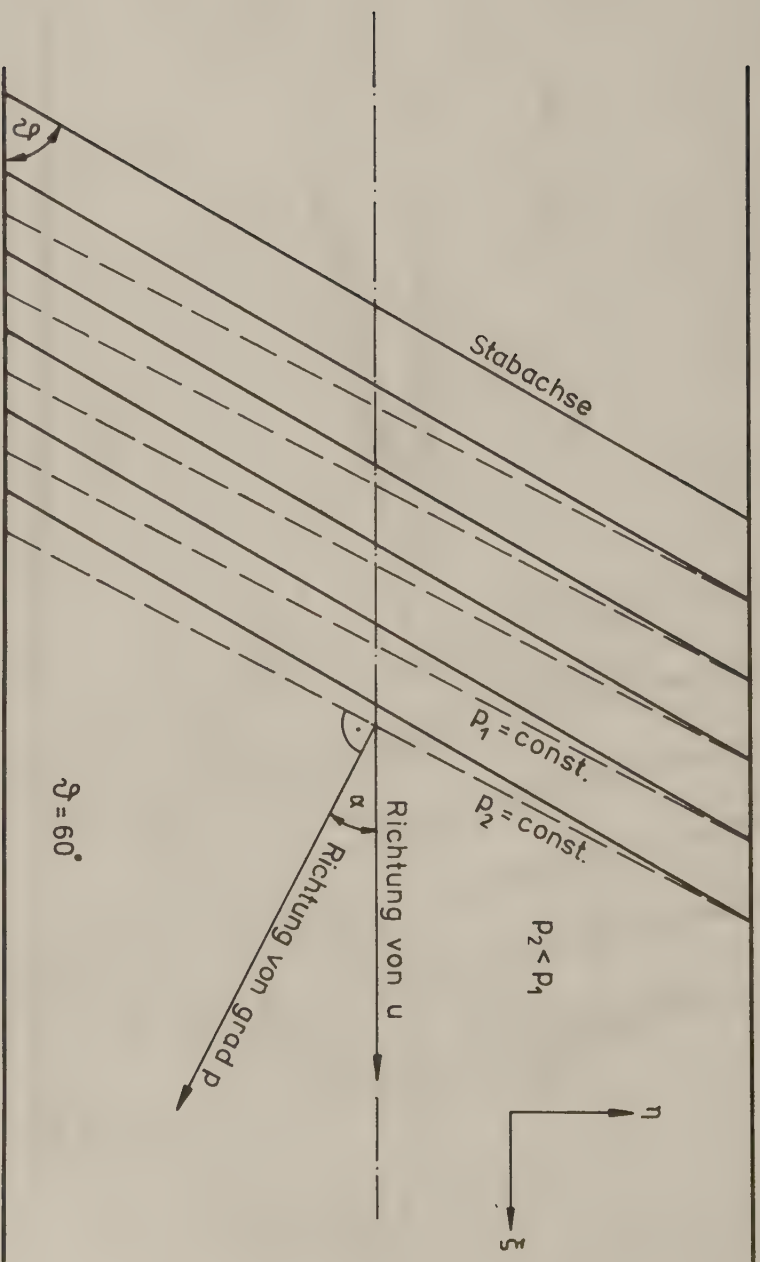


Bild 18 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Vierecksanordnung

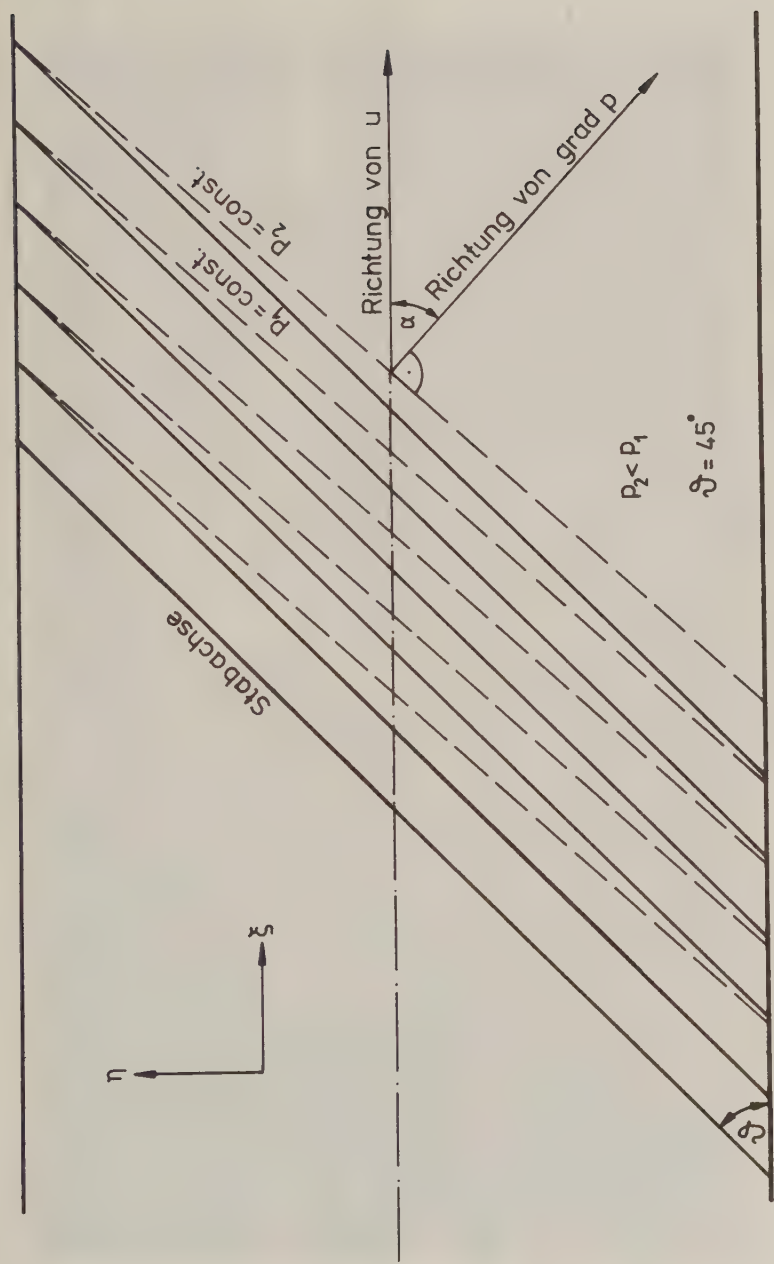


Bild 19 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Vierecksanordnung

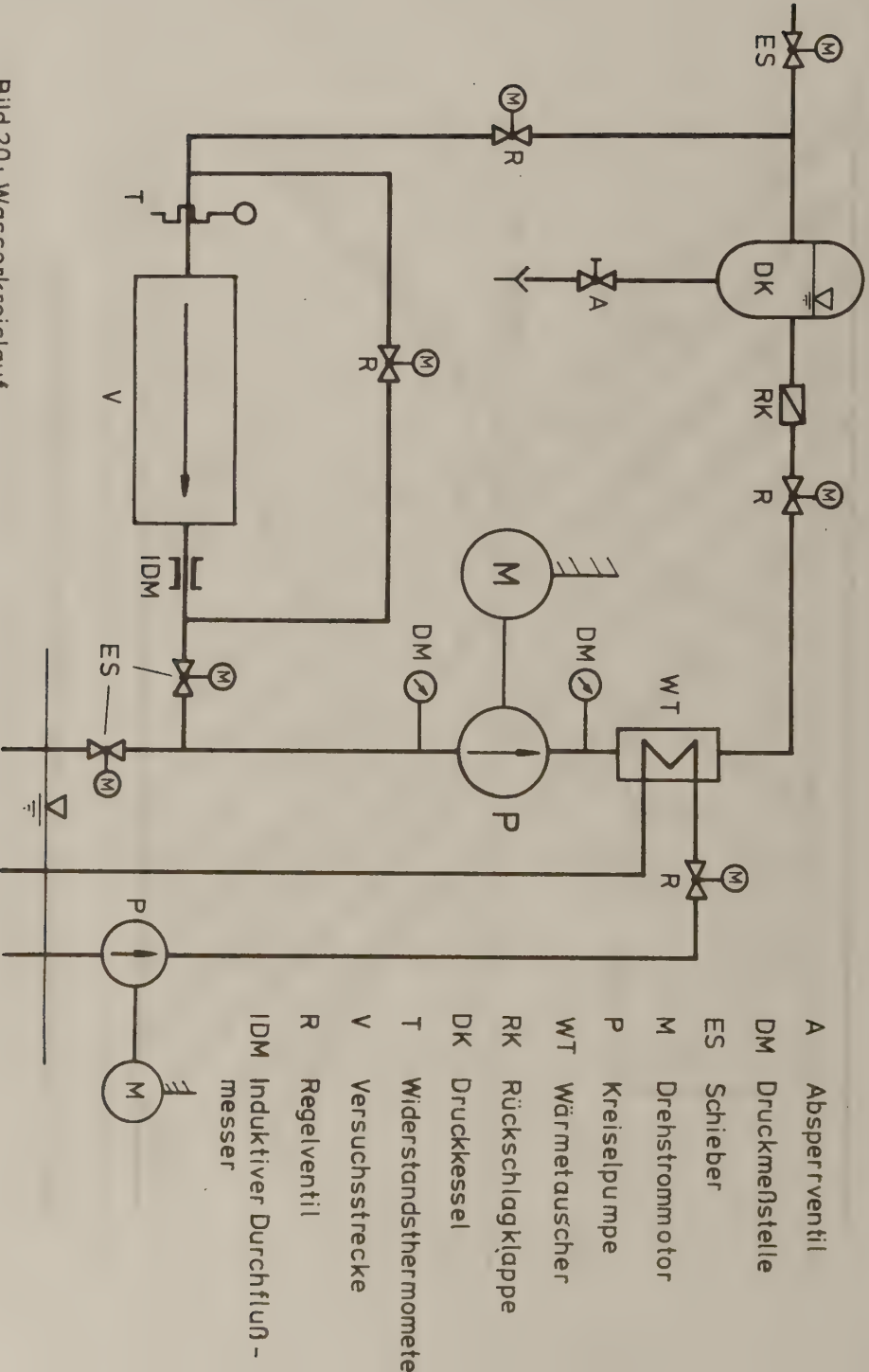


Bild 20: Wasserkreislauf

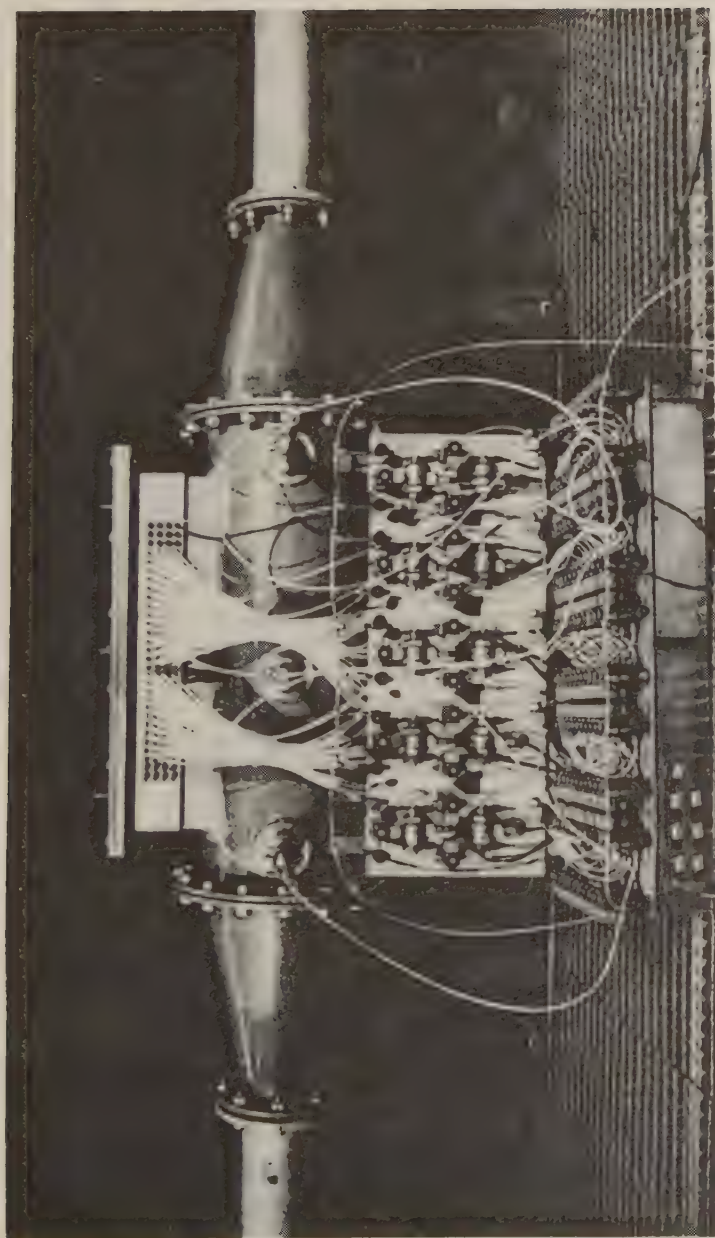
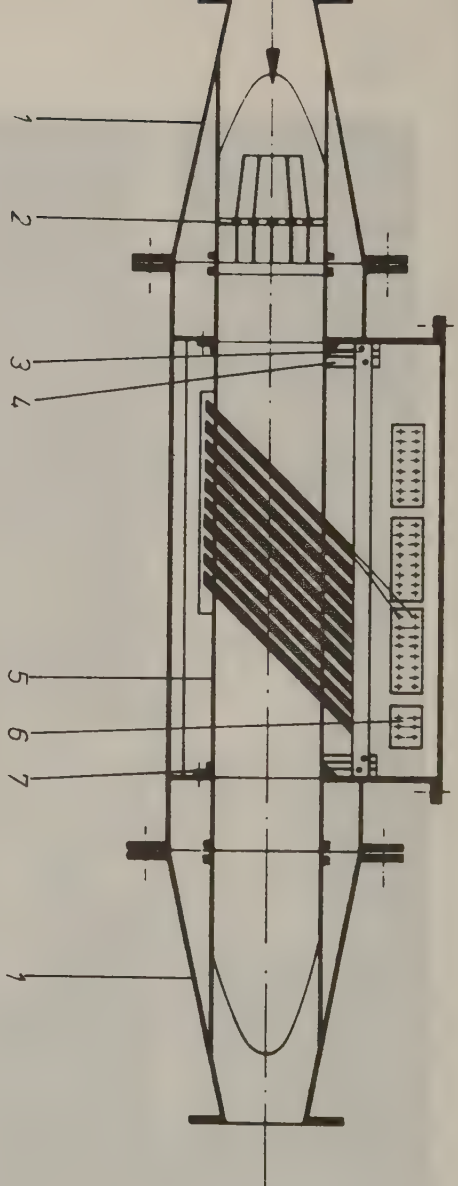


Bild 21 . Versuchsstrecke mit Druckaufnehmern und Magnetventilen



1 Übergangsstufe

2 Lei tapparat

3 Niederhaltung

4 Führungen

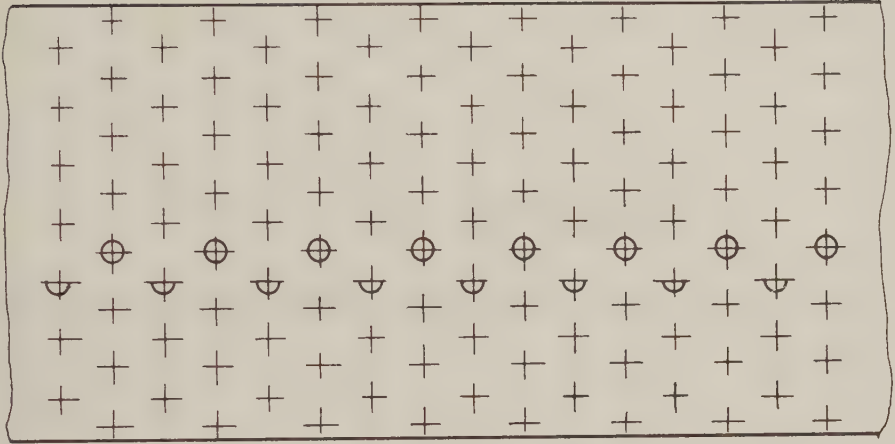
5 Meßeinsatz

6 Schlauchdurchführungen

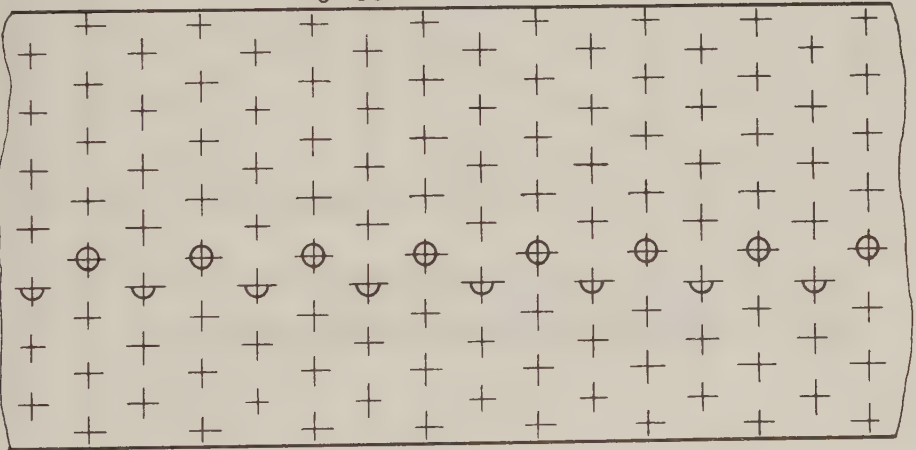
7 Abschottung

Bild 22 : Versuchsstrecke mit eingebautem Meßeinsatz

$\vartheta = 75^\circ$



$\vartheta = 60^\circ$



≙

Meßsonde für den Gesamtdruck

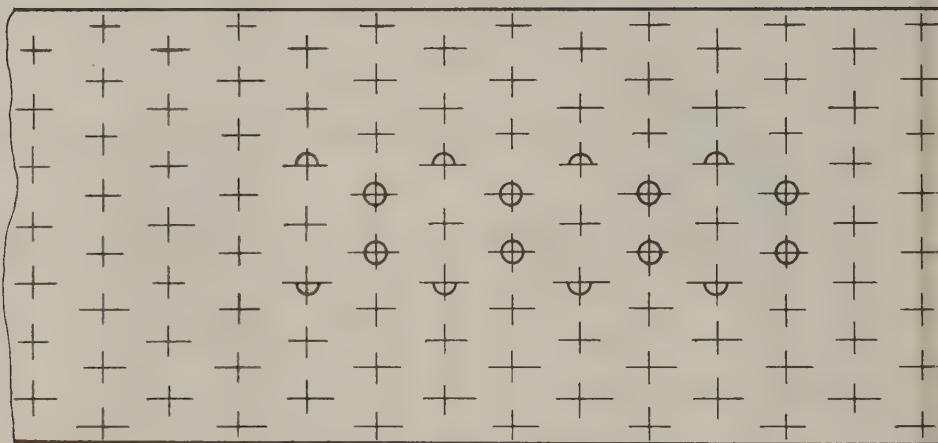


≙

Meßsonde für den statischen Druck

Bild 23 : Rohrverband bei $\vartheta = 75^\circ$ u. 60°

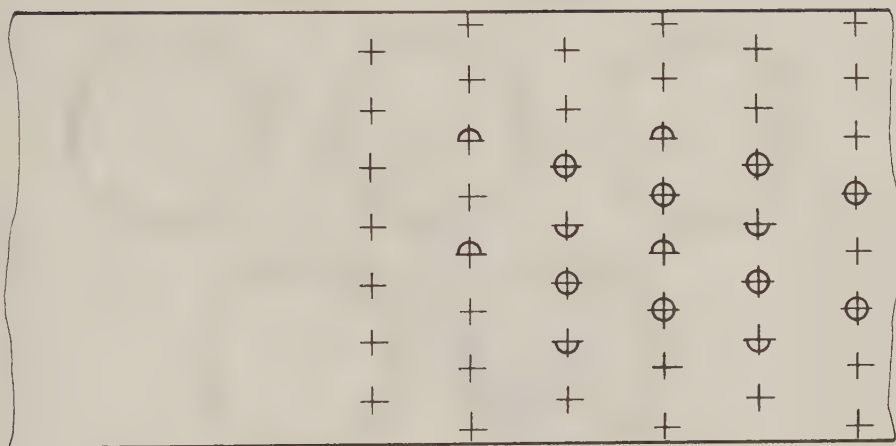

 Strömungsrichtung



 $\hat{=}$ Meßsonde für den Gesamtdruck
 $\hat{=}$ Meßsonde für den statischen Druck

Bild 24 : Rohrverband bei $\vartheta = 45^\circ$


 Strömungsrichtung



-  $\triangleq$ Meßsonde für den Gesamtdruck
 $\triangleq$ Meßsonde für den statischen Druck

Bild 25 : Rohrverband bei $\vartheta = 30^\circ$

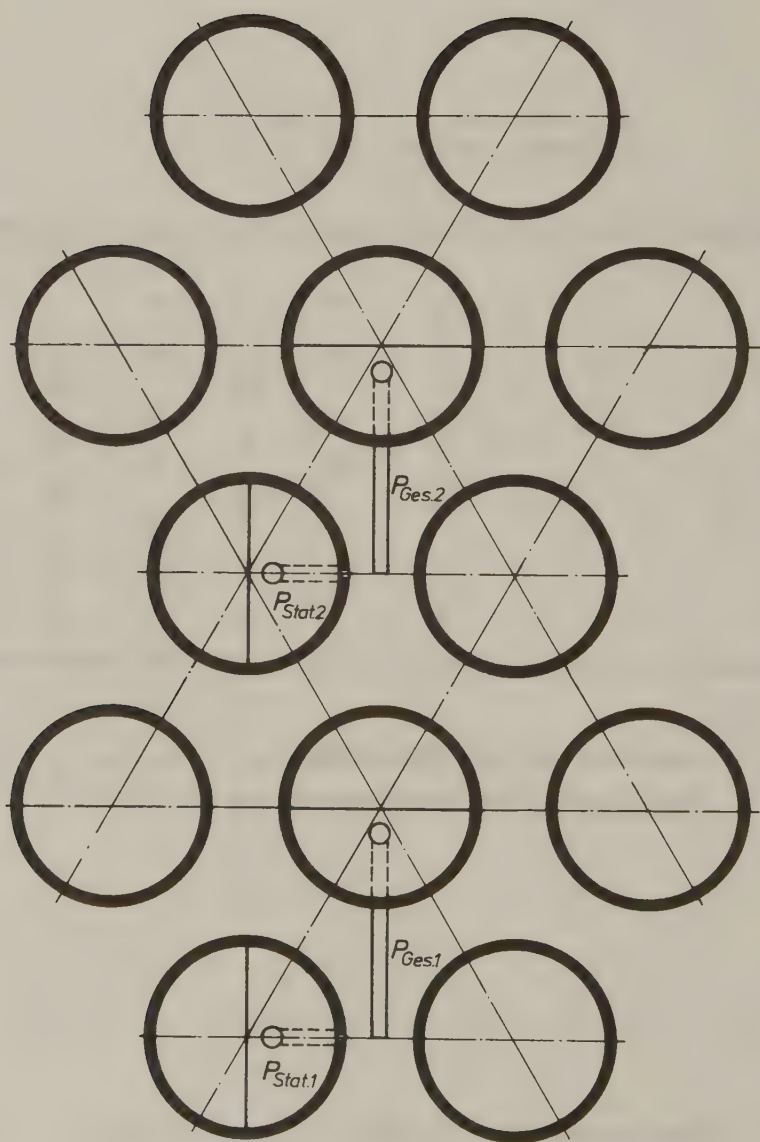


Bild 26 : Anordnung der Meßsonden in Strömungsrichtung

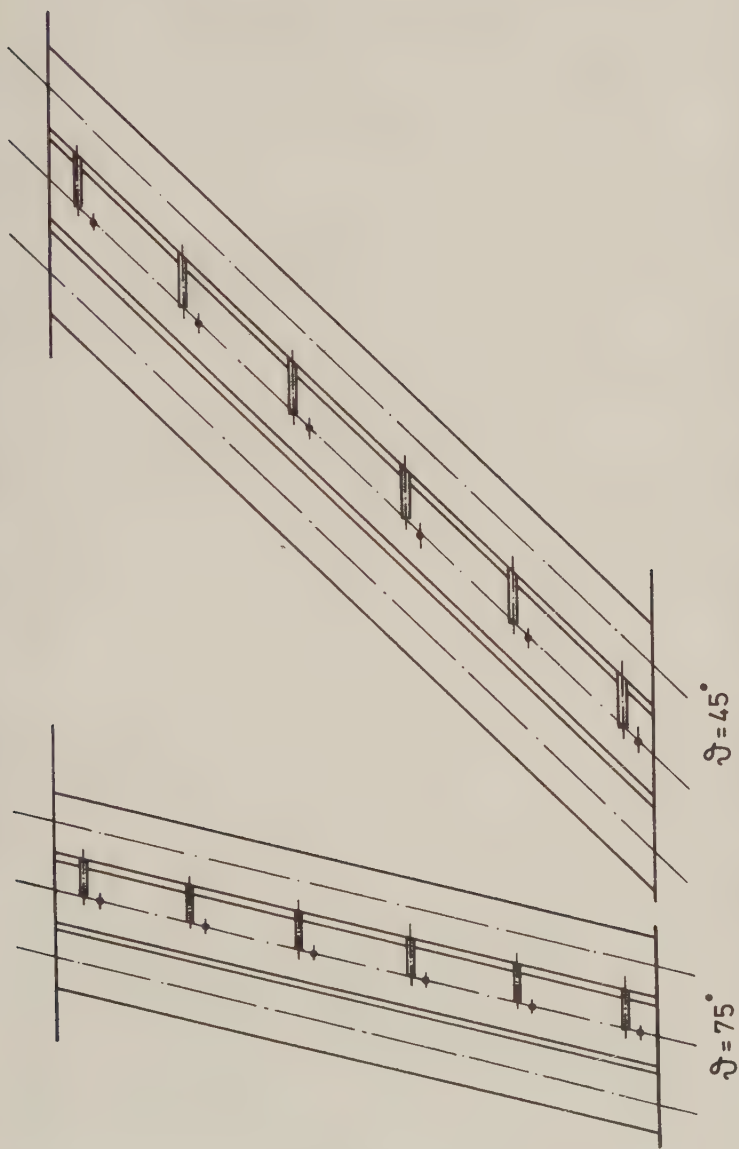


Bild 27 : Lage der Meißonden in Richtung der Stabachse

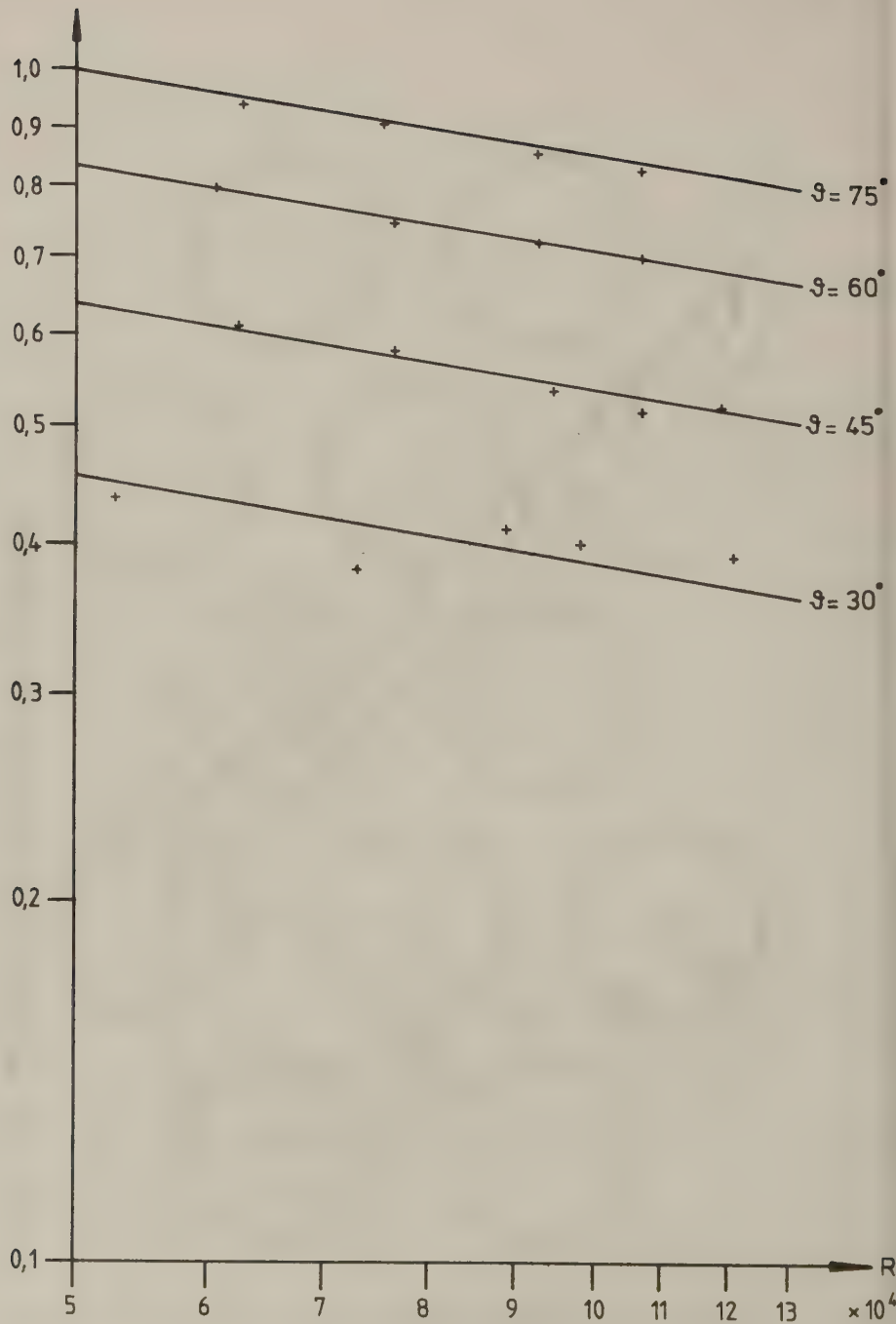


Bild 28 : Radialer, normierter Druckgradient $\hat{=} f(Re)_{\beta=\text{const}}$

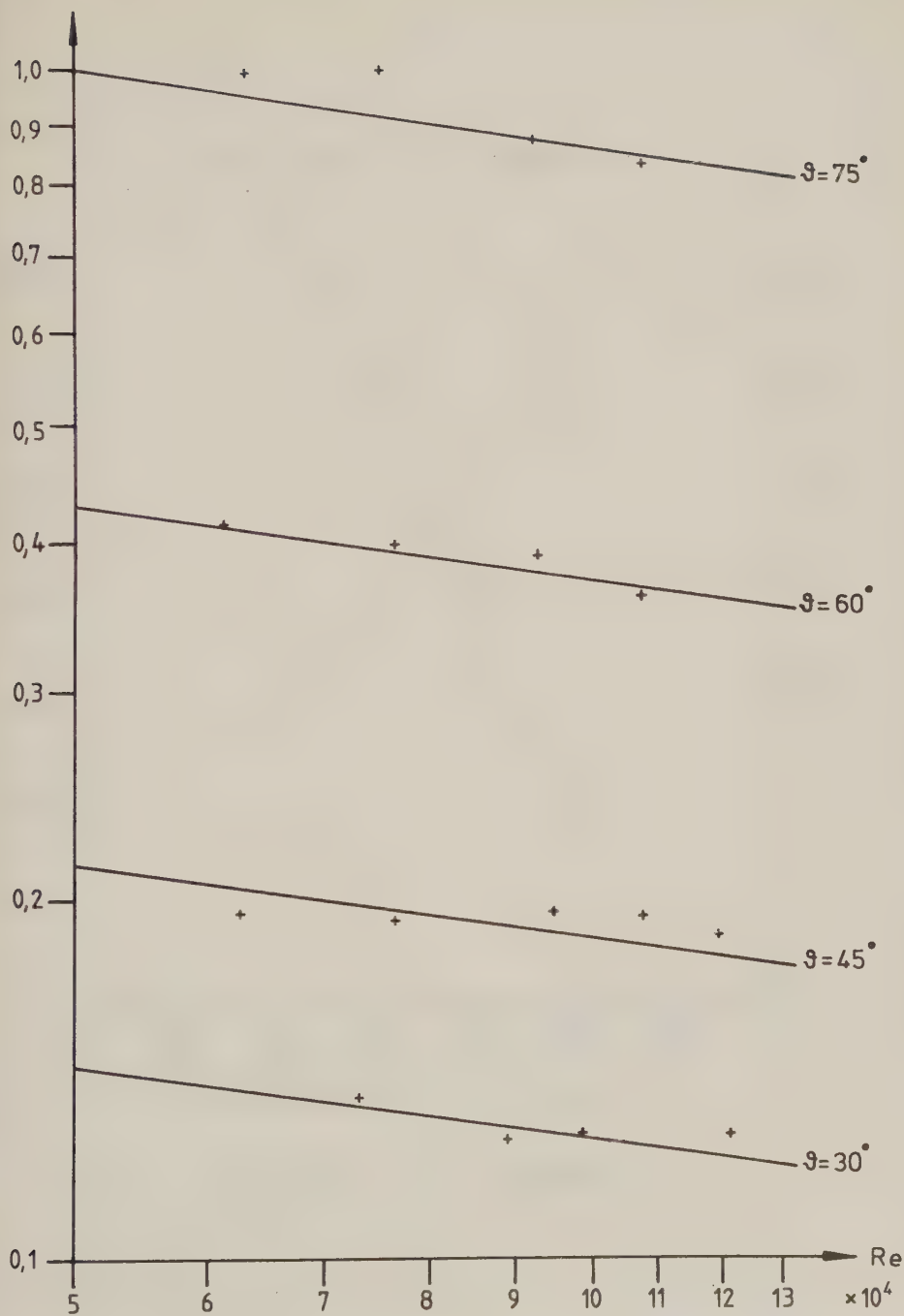
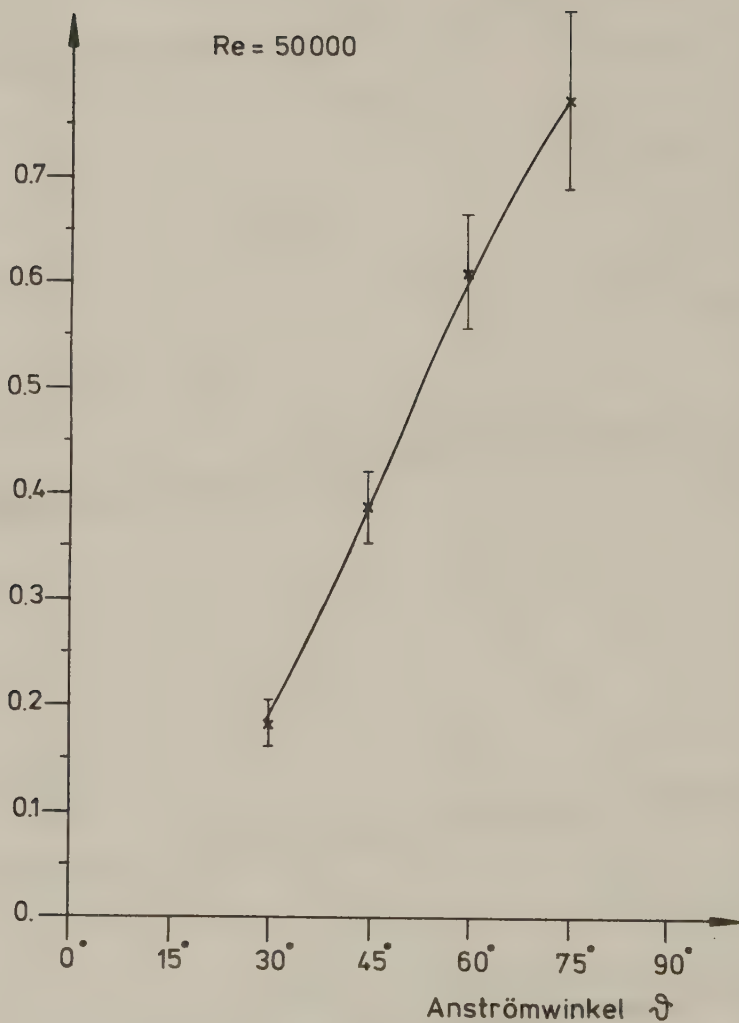


Bild 29 : Axialer, normierter Druckgradient $\cong f(Re)_{\beta=\text{const}}$



× Meßwerte

Bild 30a : Dimensionsloser Druckgradient in radialer Richtung

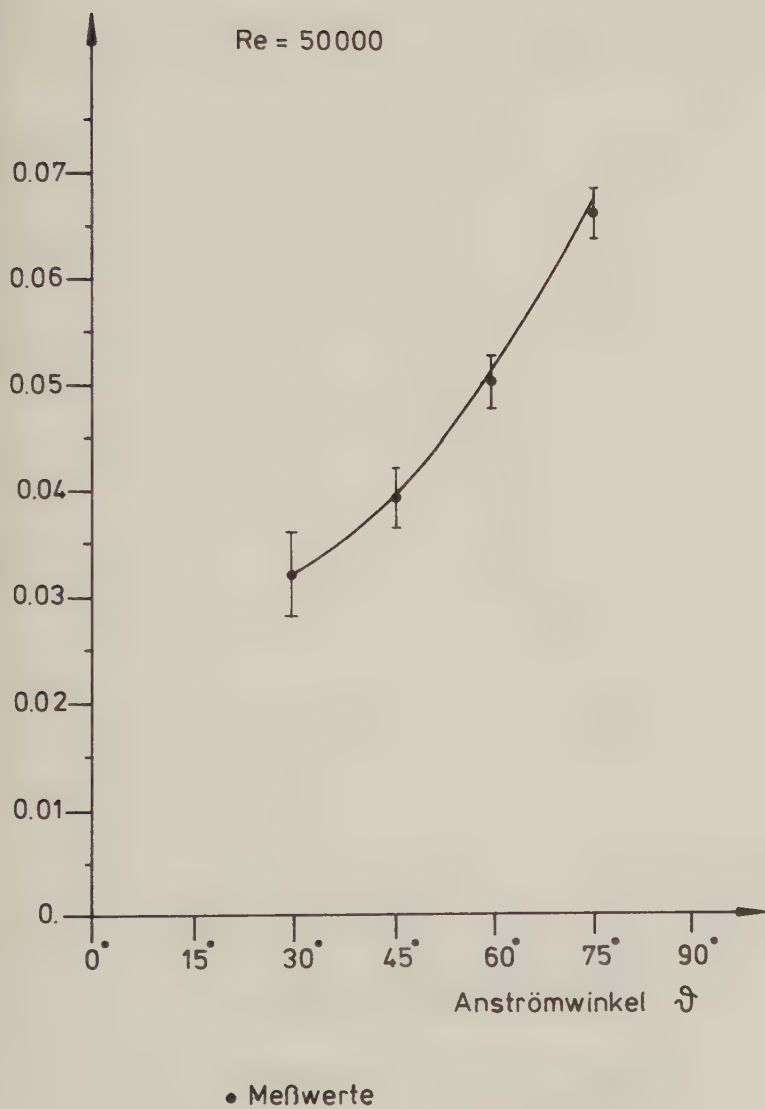
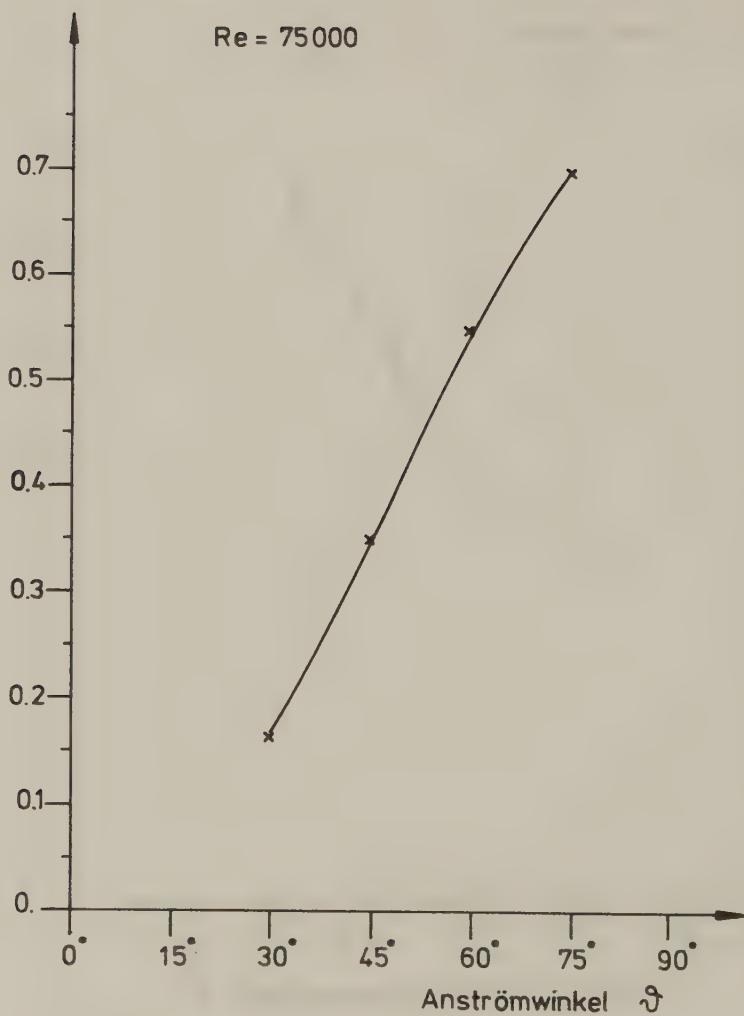
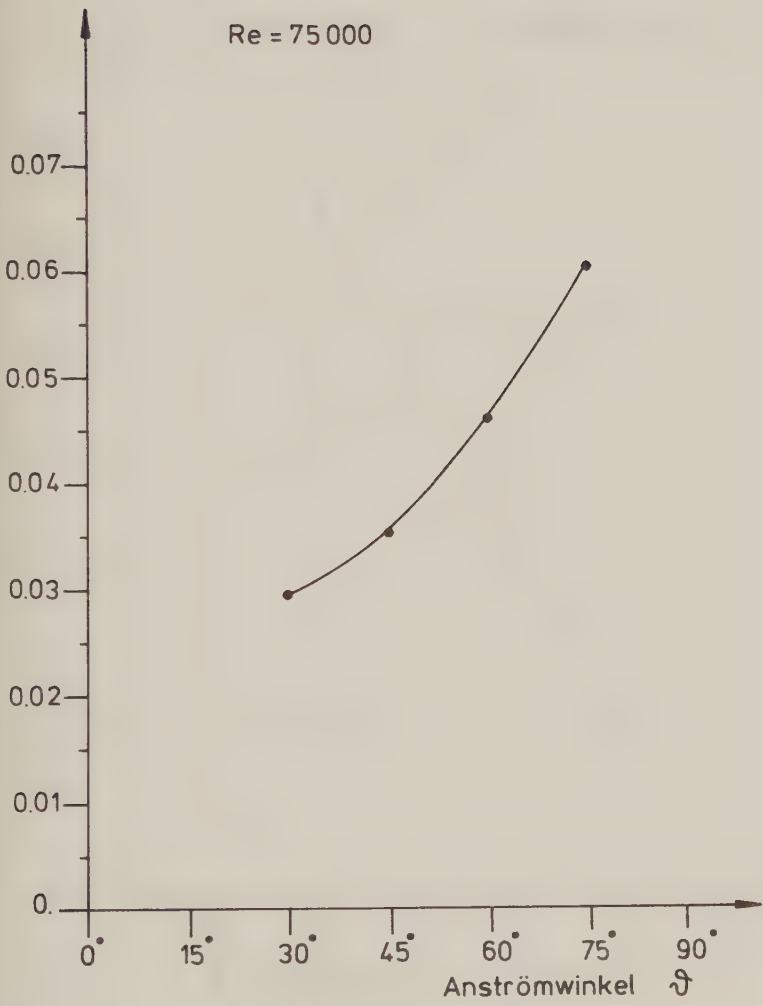


Bild 30b: Dimensionsloser Druckgradient in axialer Richtung



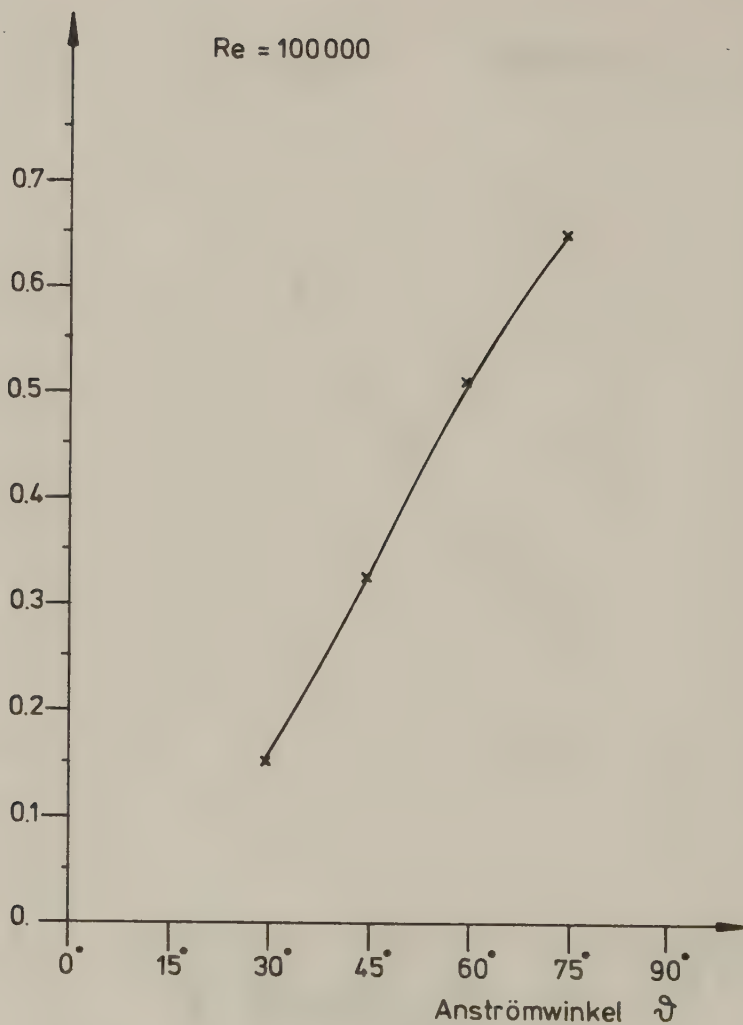
x Meßwerte

Bild 31a : Dimensionsloser Druckgradient in radialer Richtung



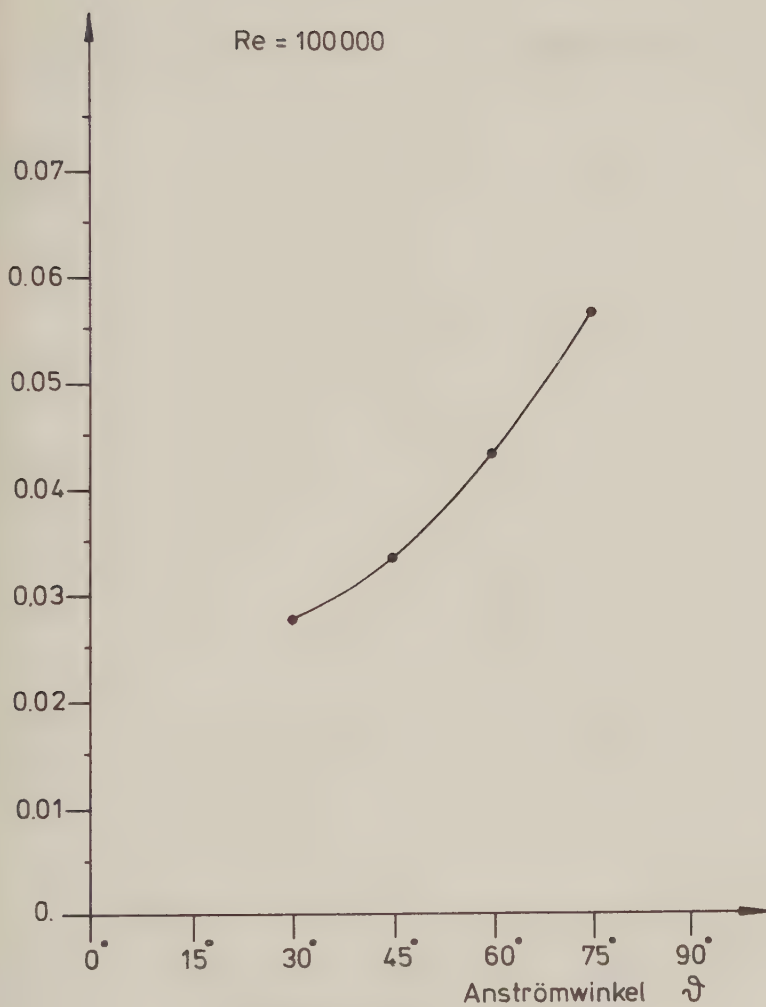
• Meßwerte

Bild 31b : Dimensionsloser Druckgradient in axialer Richtung



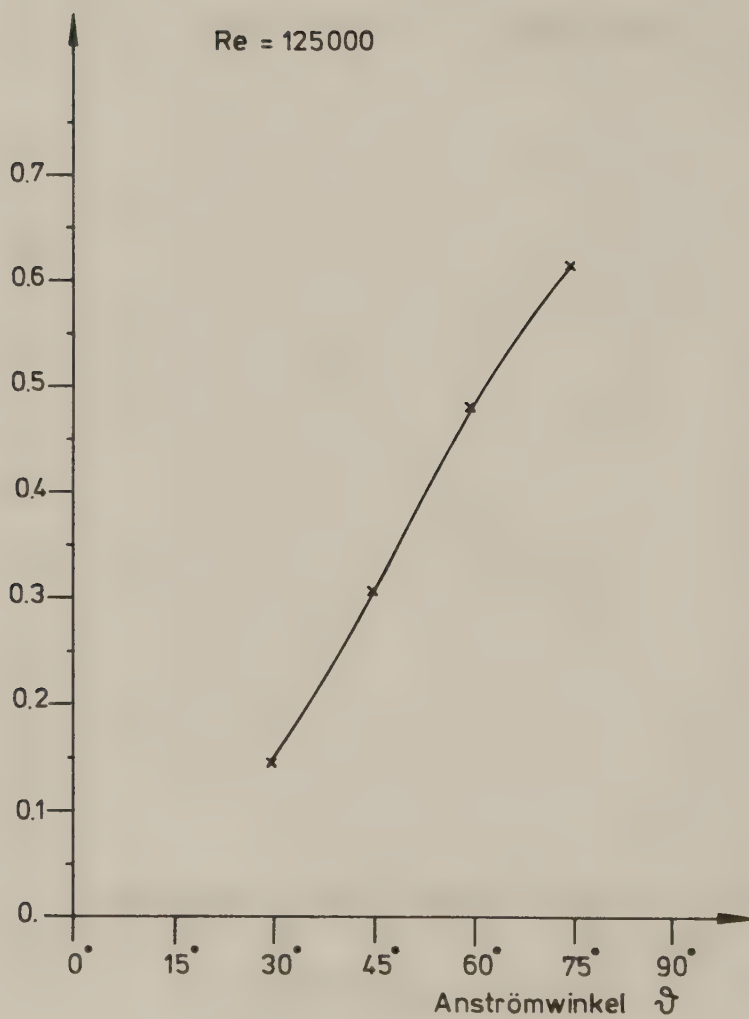
x Meßwerte

Bild 32a : Dimensionsloser Druckgradient in radialer Richtung



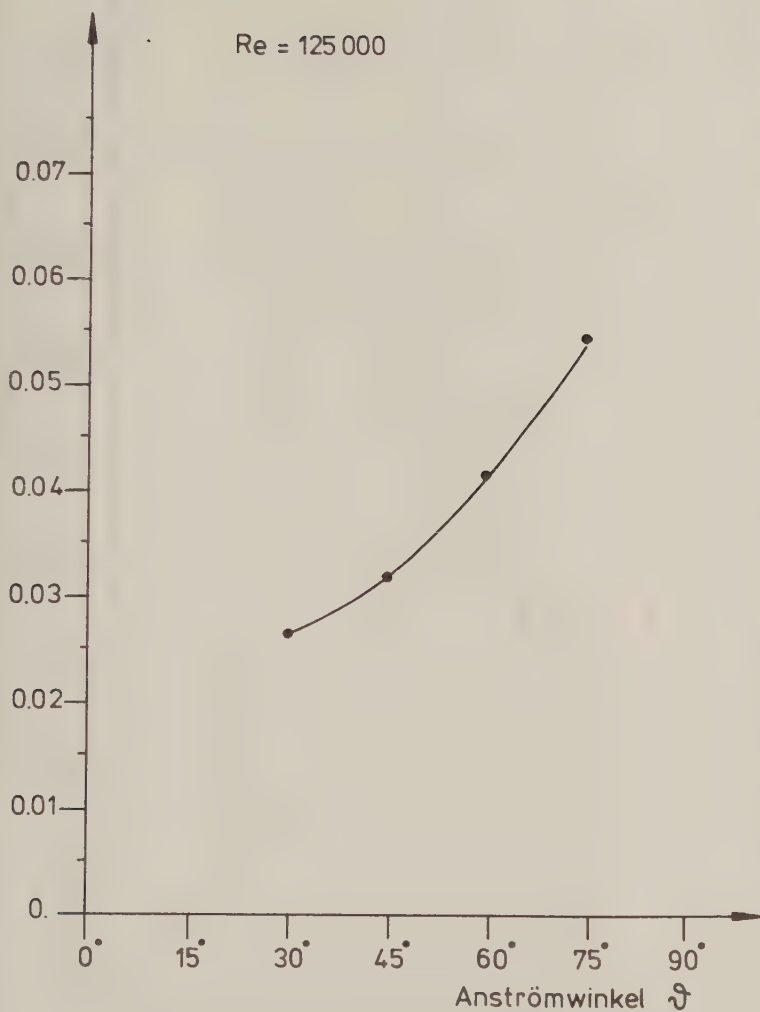
• Meßpunkte

Bild 32b: Dimensionsloser Druckgradient in axialer Richtung



x Meßwerte

Bild 33a : Dimensionsloser Druckgradient in radialer Richtung



• Meßwerte

Bild 33b : Dimensionsloser Druckgradient in axialer Richtung

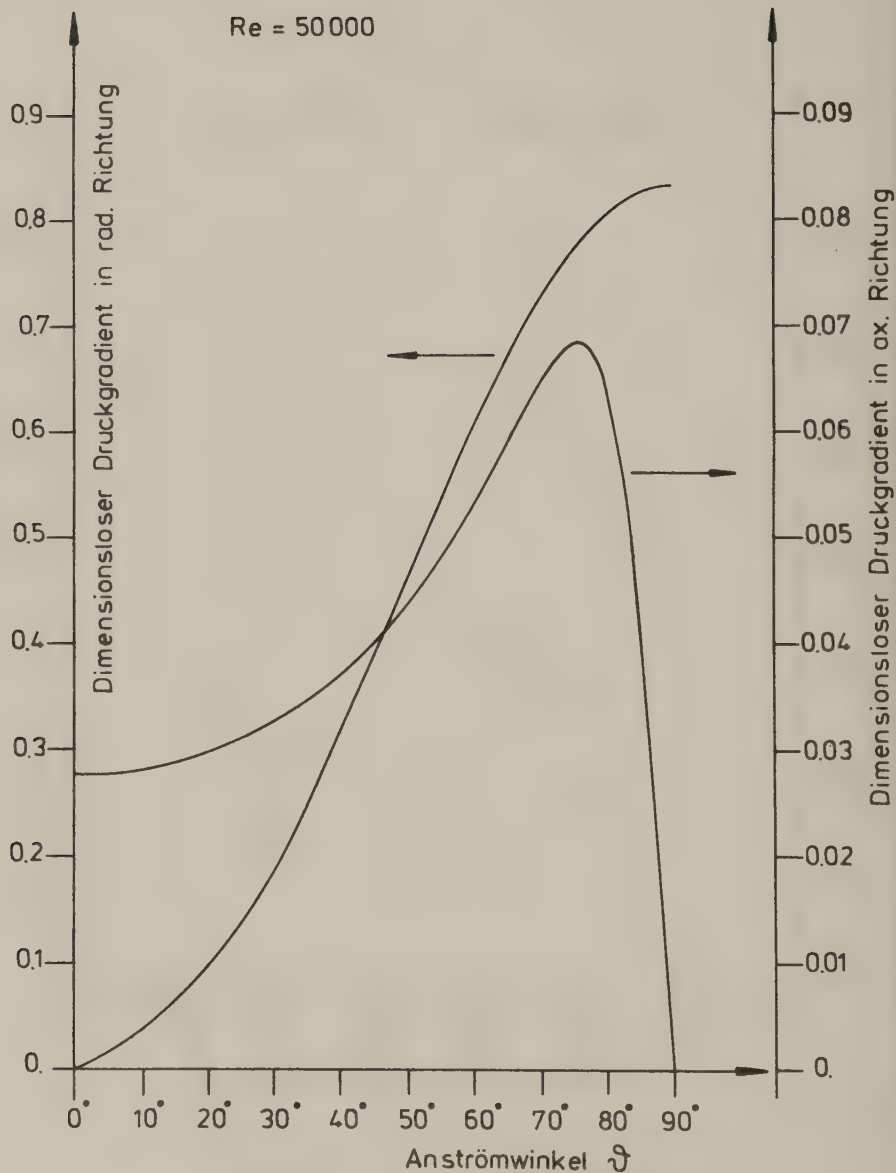


Bild 34: Verlauf der Druckgradienten über ϑ

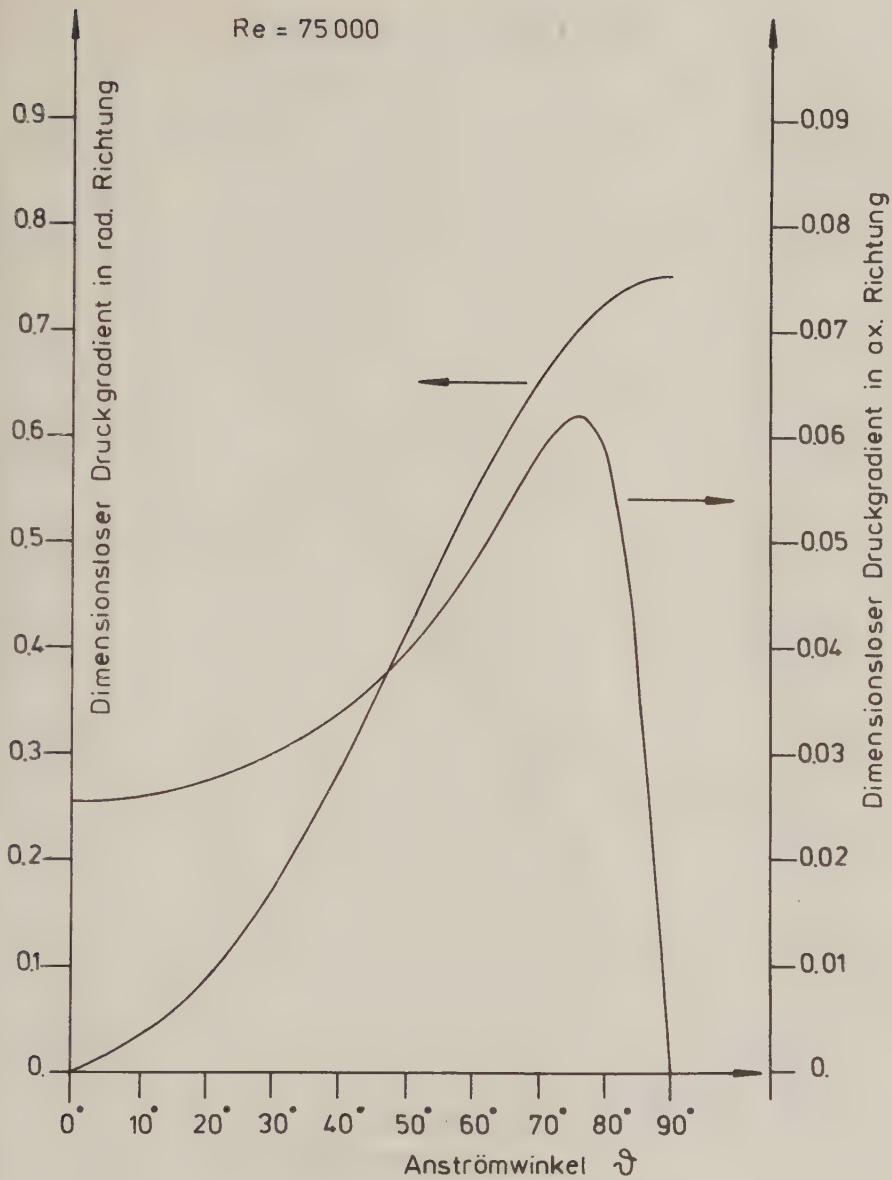


Bild 35: Verlauf der Druckgradienten über ϑ

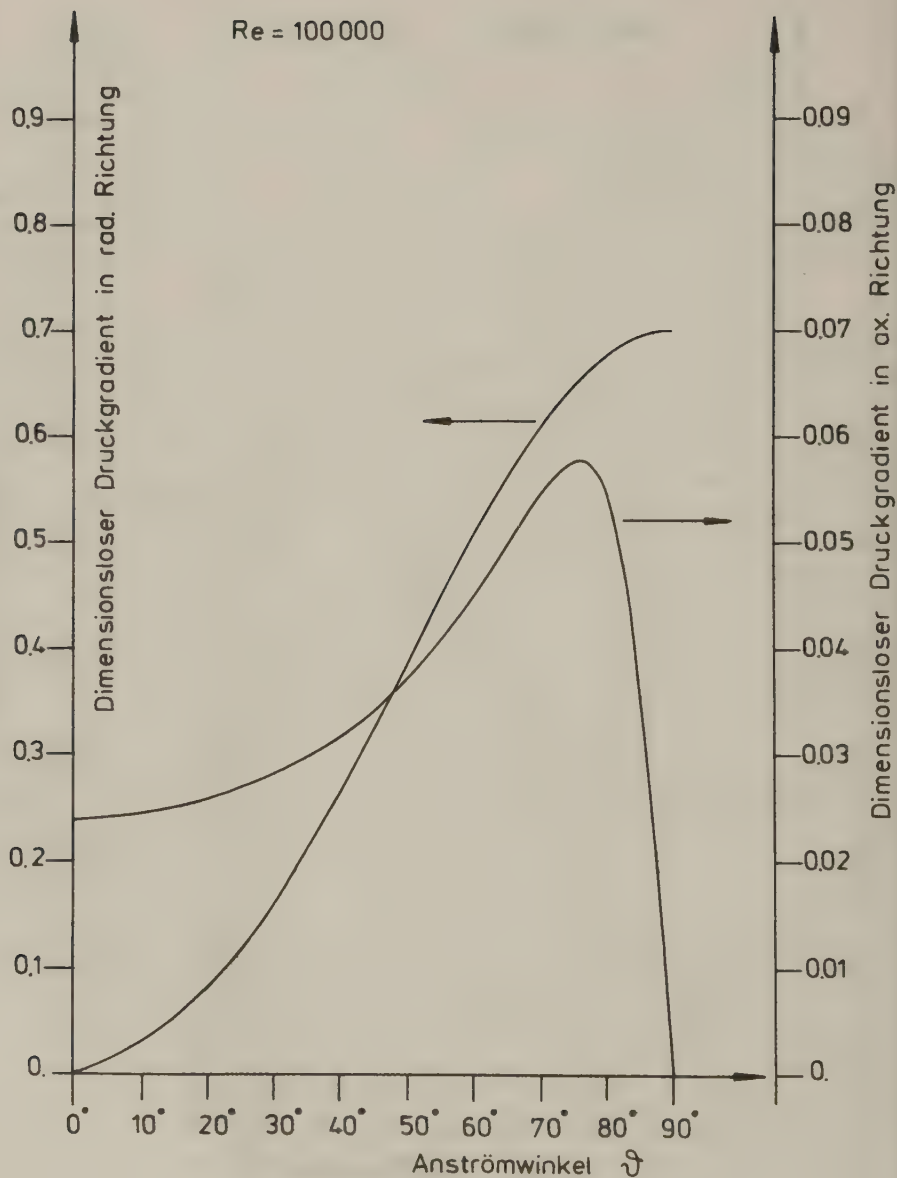


Bild 36: Verlauf der Druckgradienten über ϑ

$Re = 125\,000$

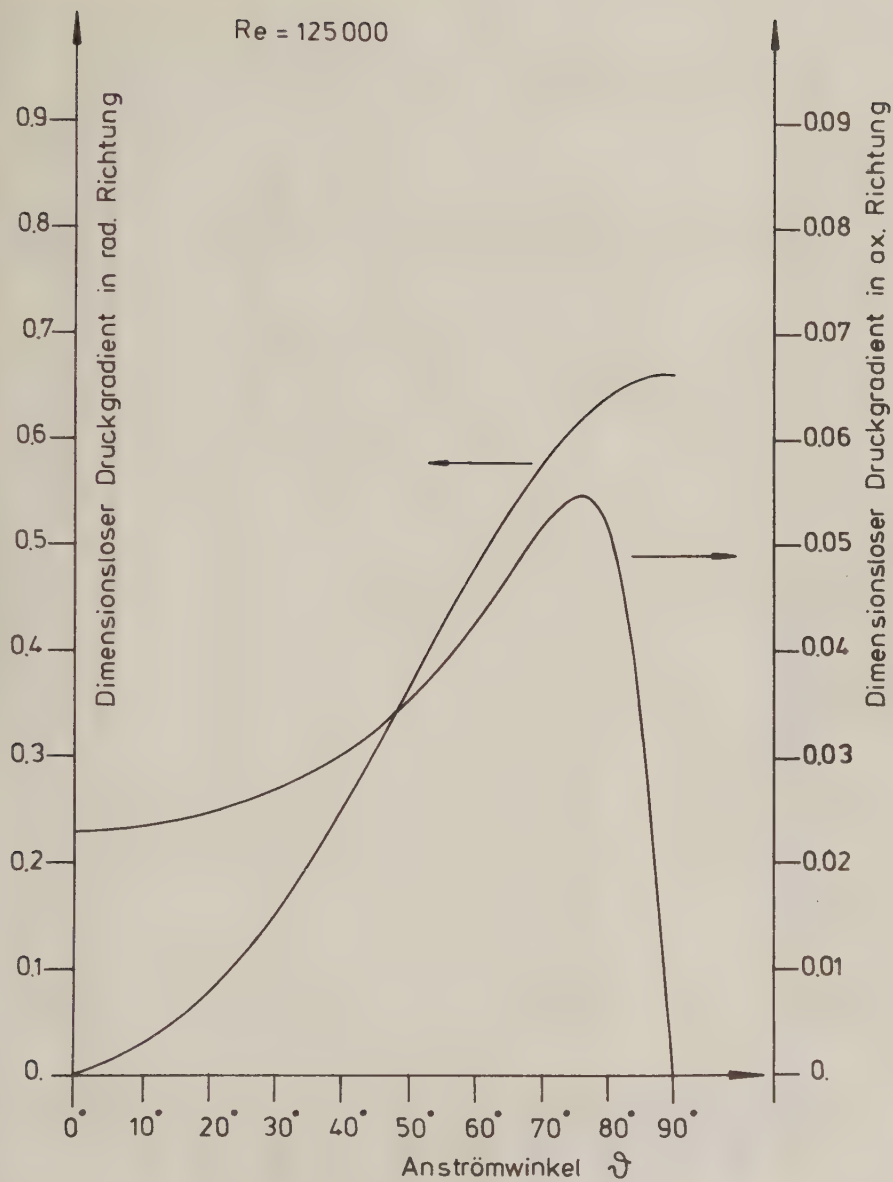


Bild 37: Verlauf der Druckgradienten über ϑ

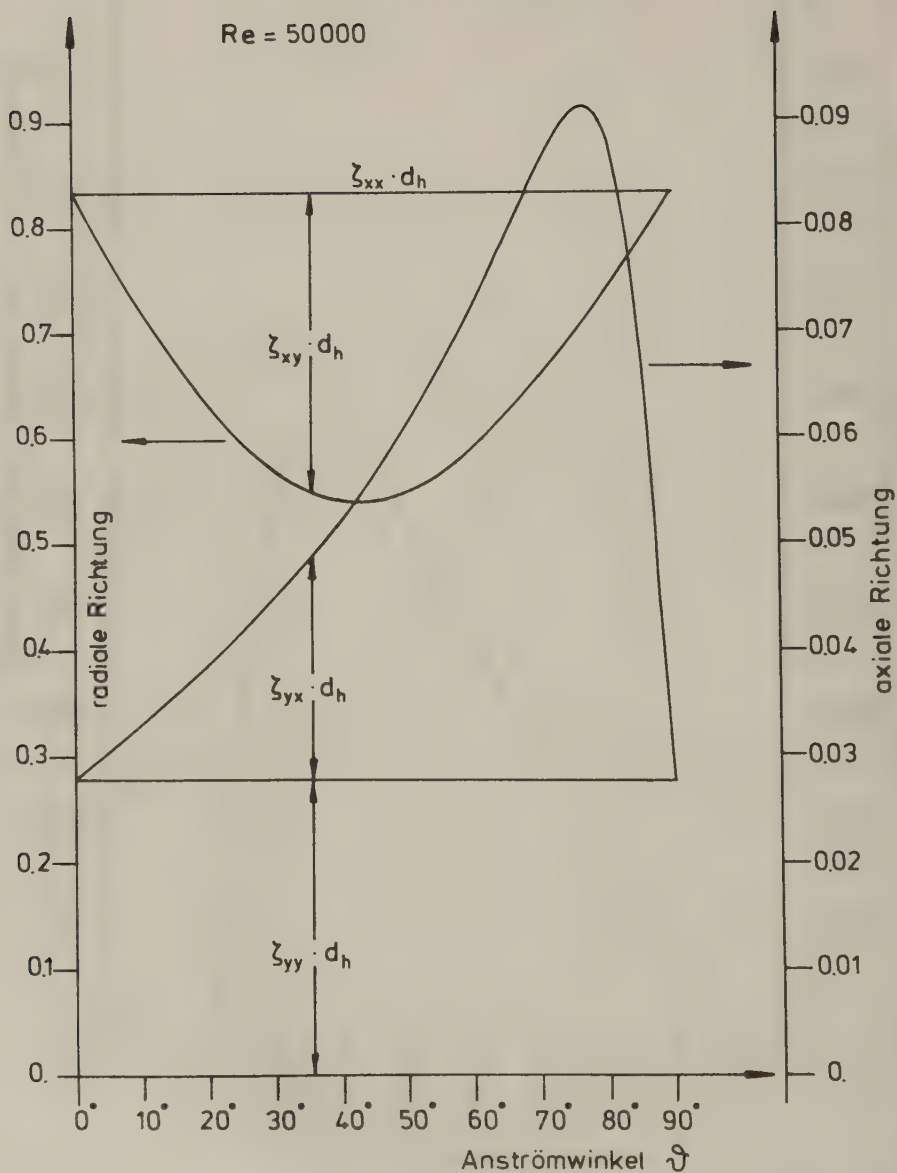


Bild 38 : Dimensionslose Matrixelemente auf Grund der Meßwerte von Hollenhorst

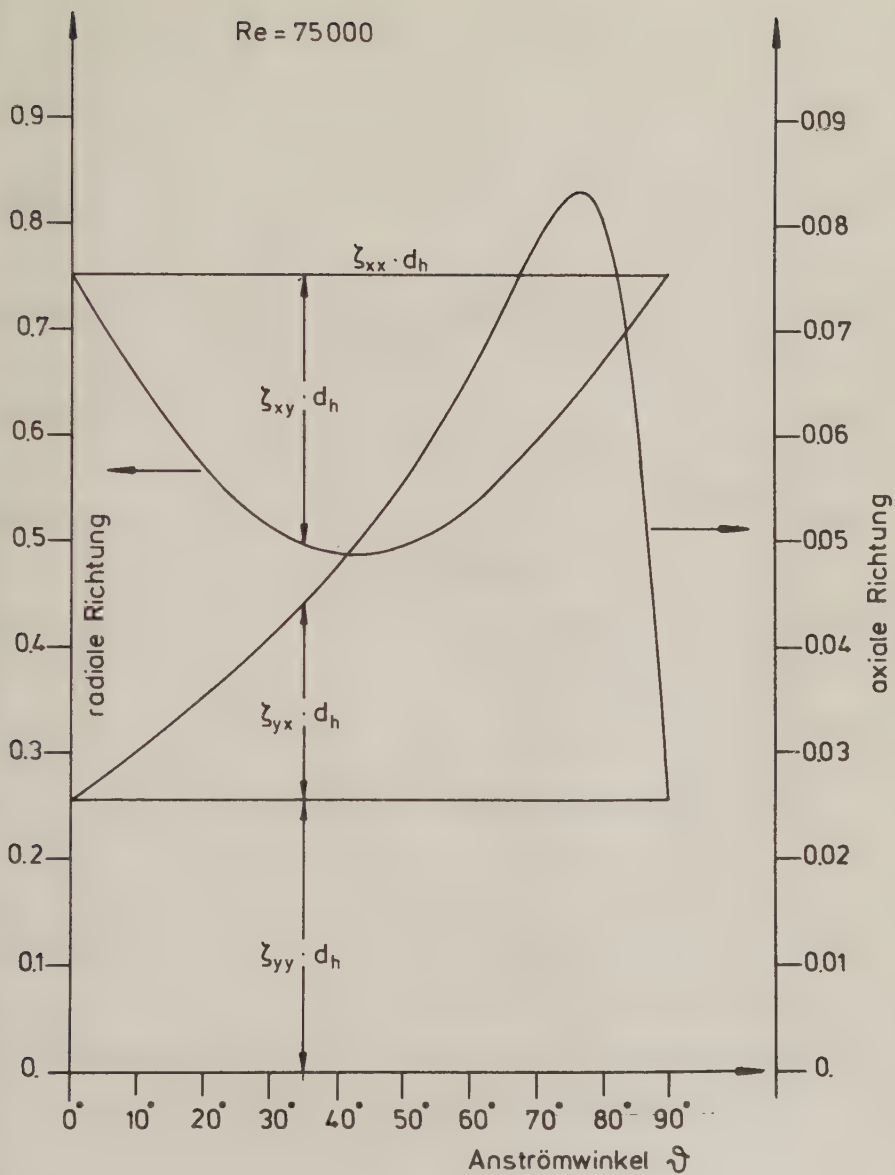


Bild 39 : Dimensionlose Matrixelemente auf Grund der Meßwerte von Hollenhorst

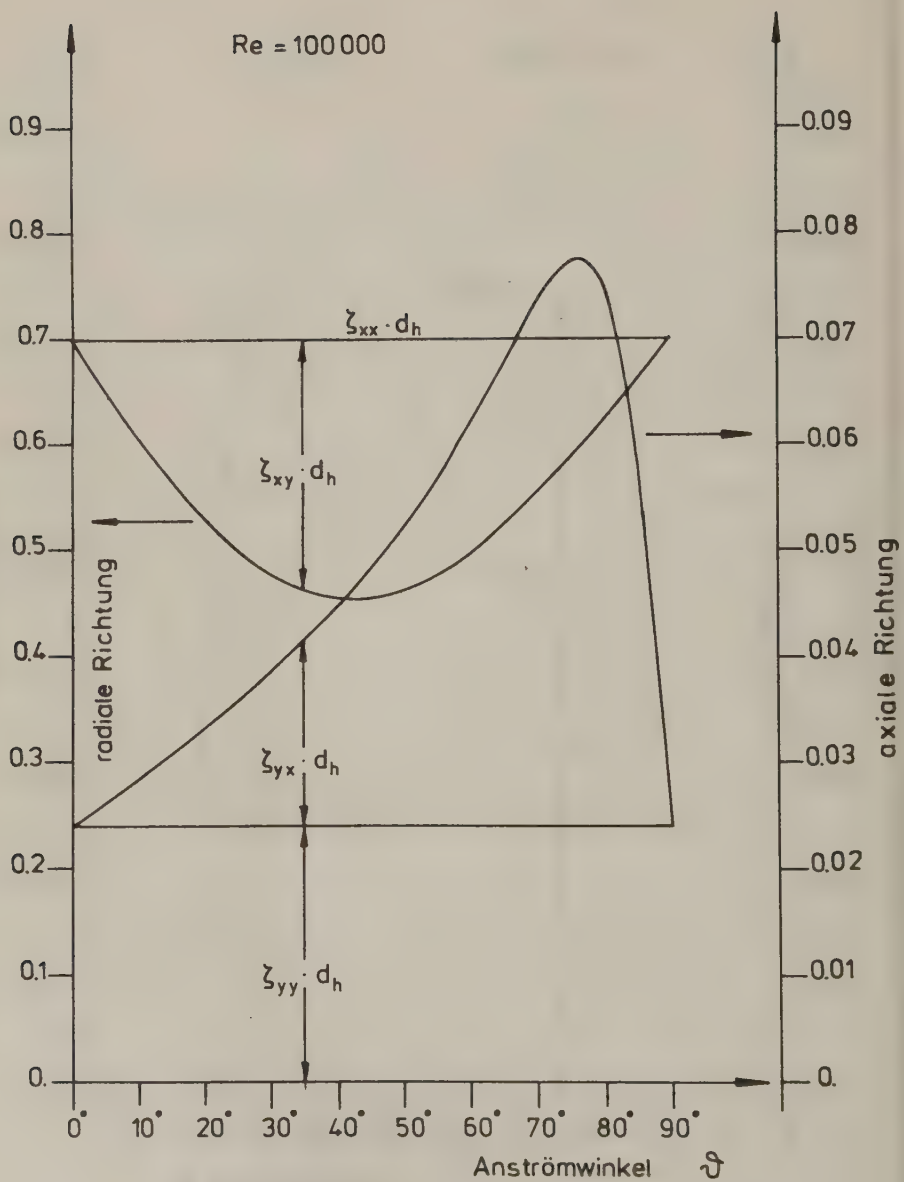


Bild 40 : Dimensionslose Matrixelemente auf Grund der Meßwerte von Hollenhorst

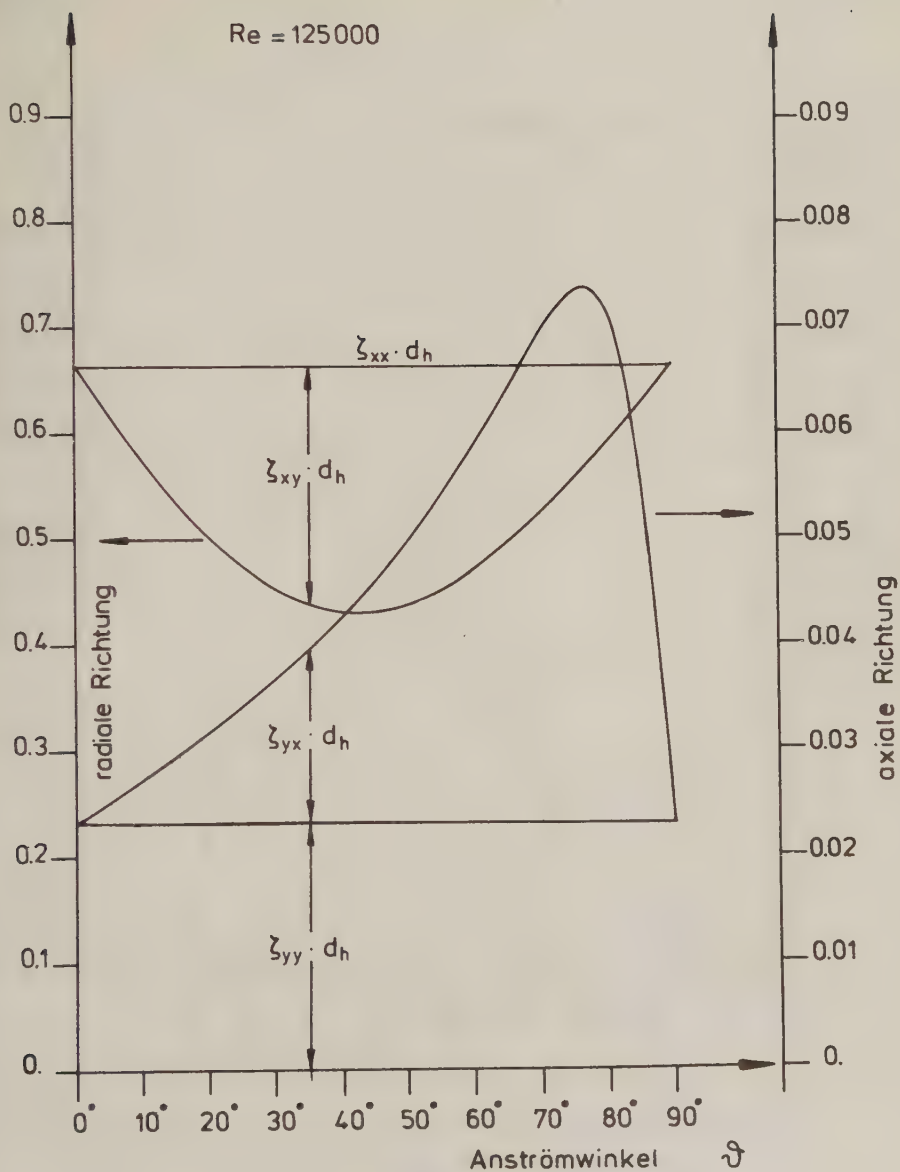


Bild 41: Dimensionslose Matrixelemente auf Grund der Meßwerte von Hollenhorst

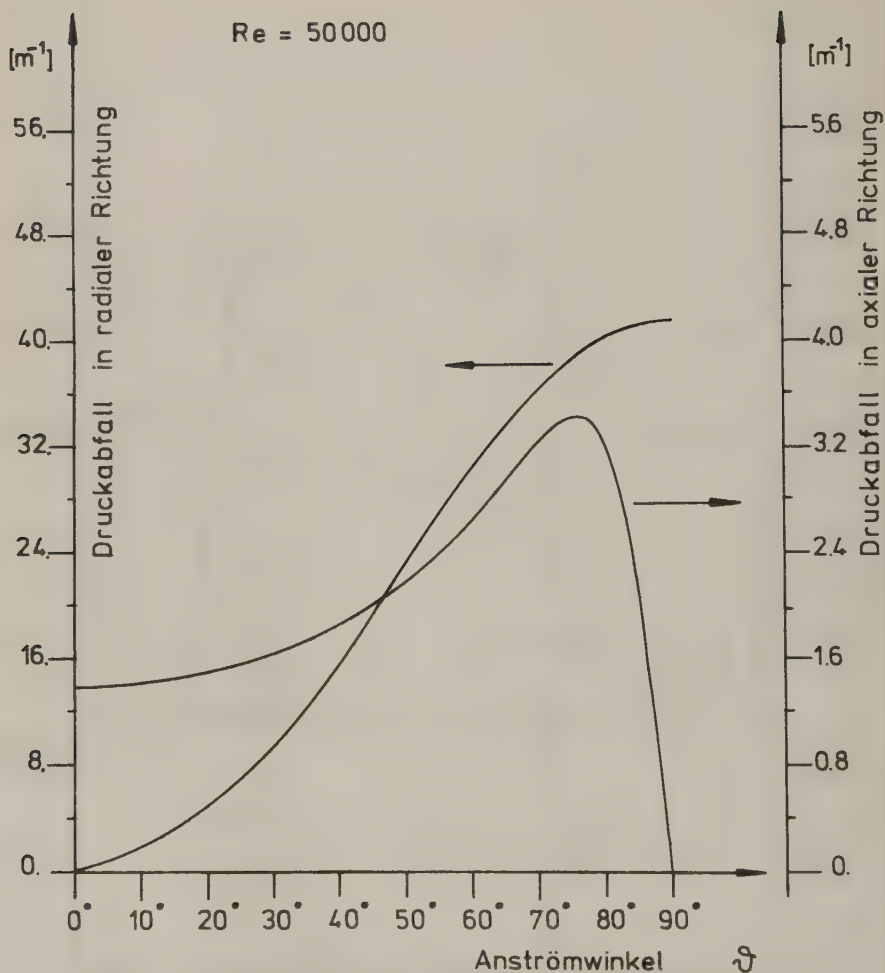


Bild 42a: Druckabfall bezogen auf den Staudruck

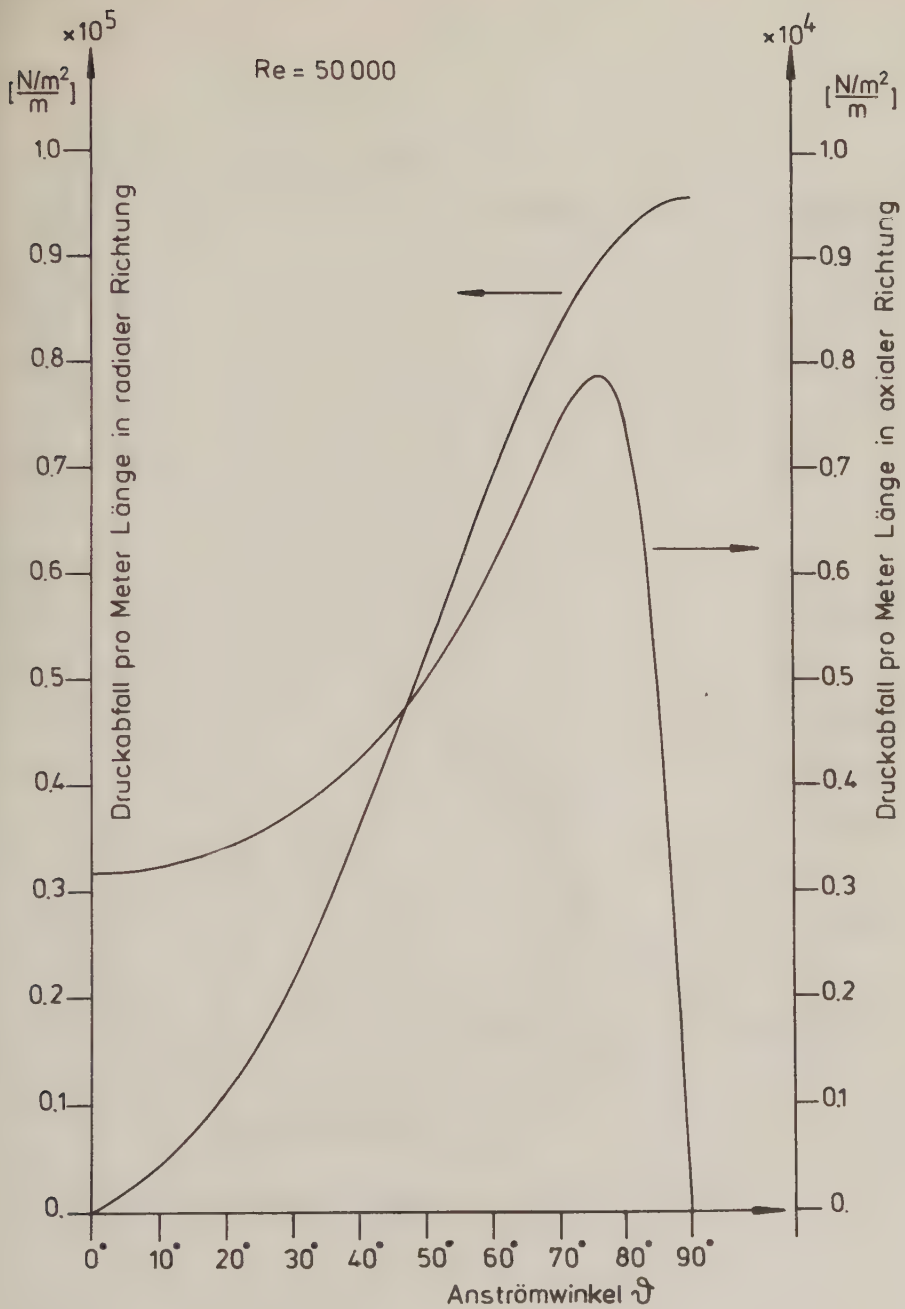


Bild 42b: Druckabfall pro Längeneinheit

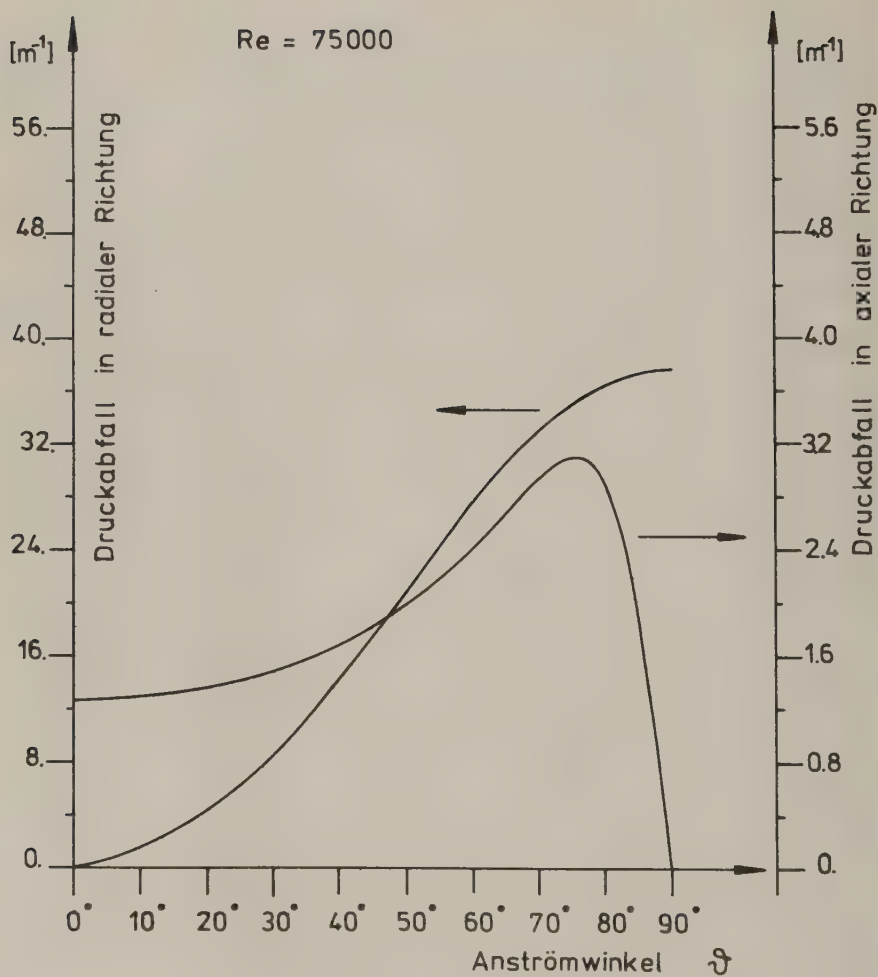


Bild 43a: Druckabfall bezogen auf den Staudruck

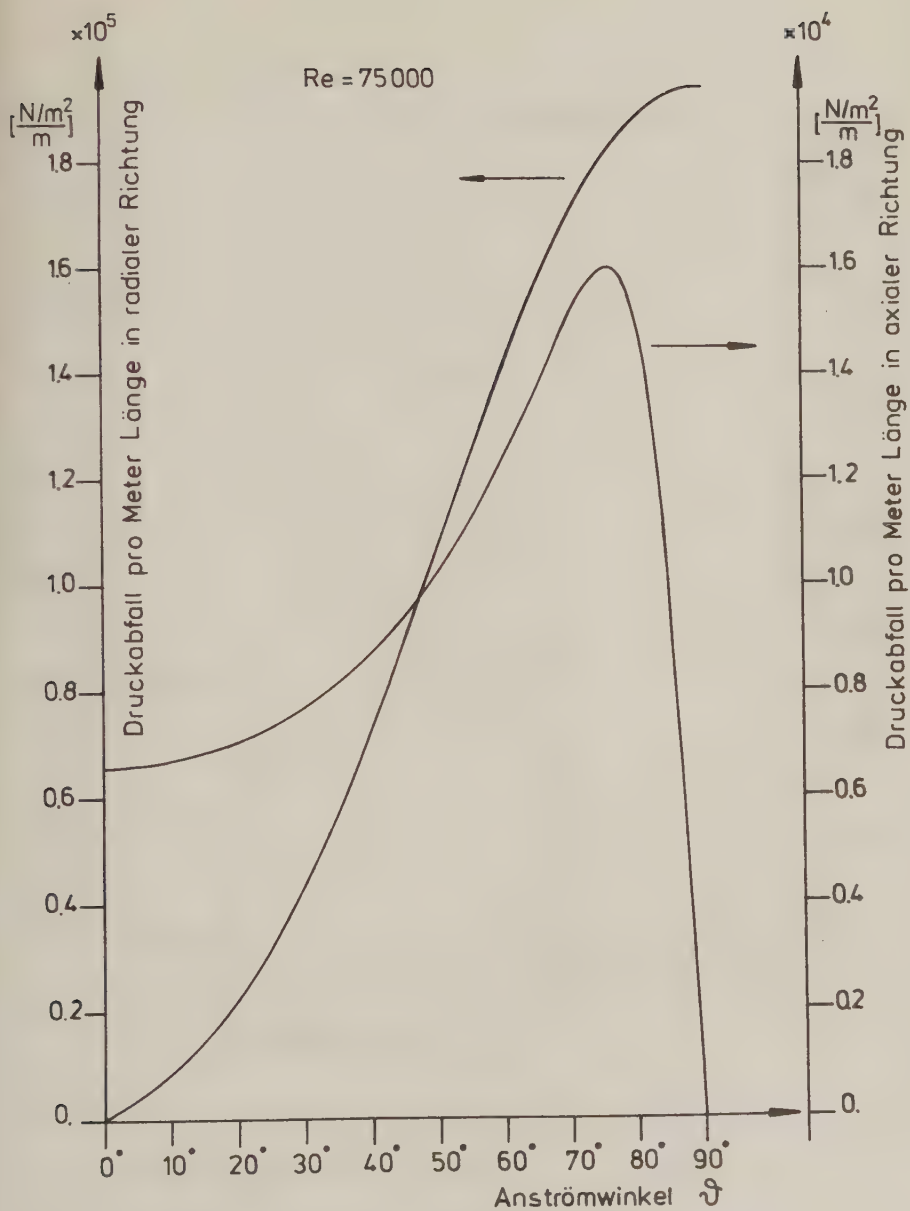


Bild 43b: Druckabfall pro Längeneinheit

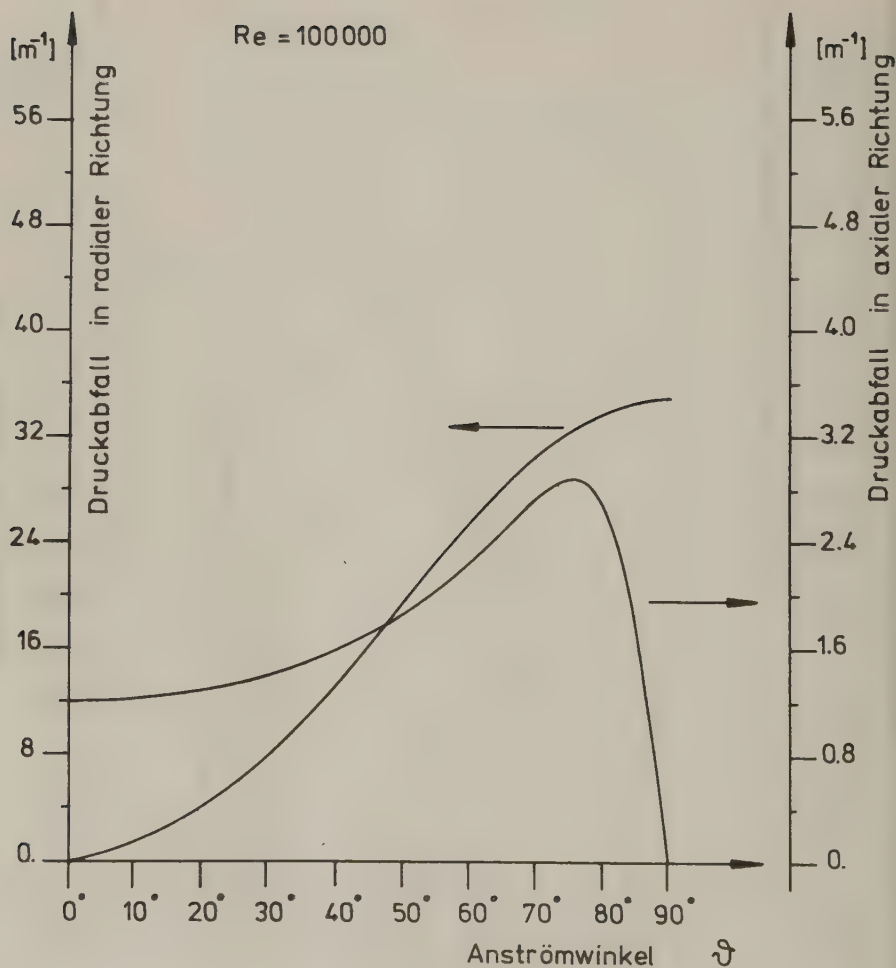


Bild 44a : Druckabfall bezogen auf den Staudruck

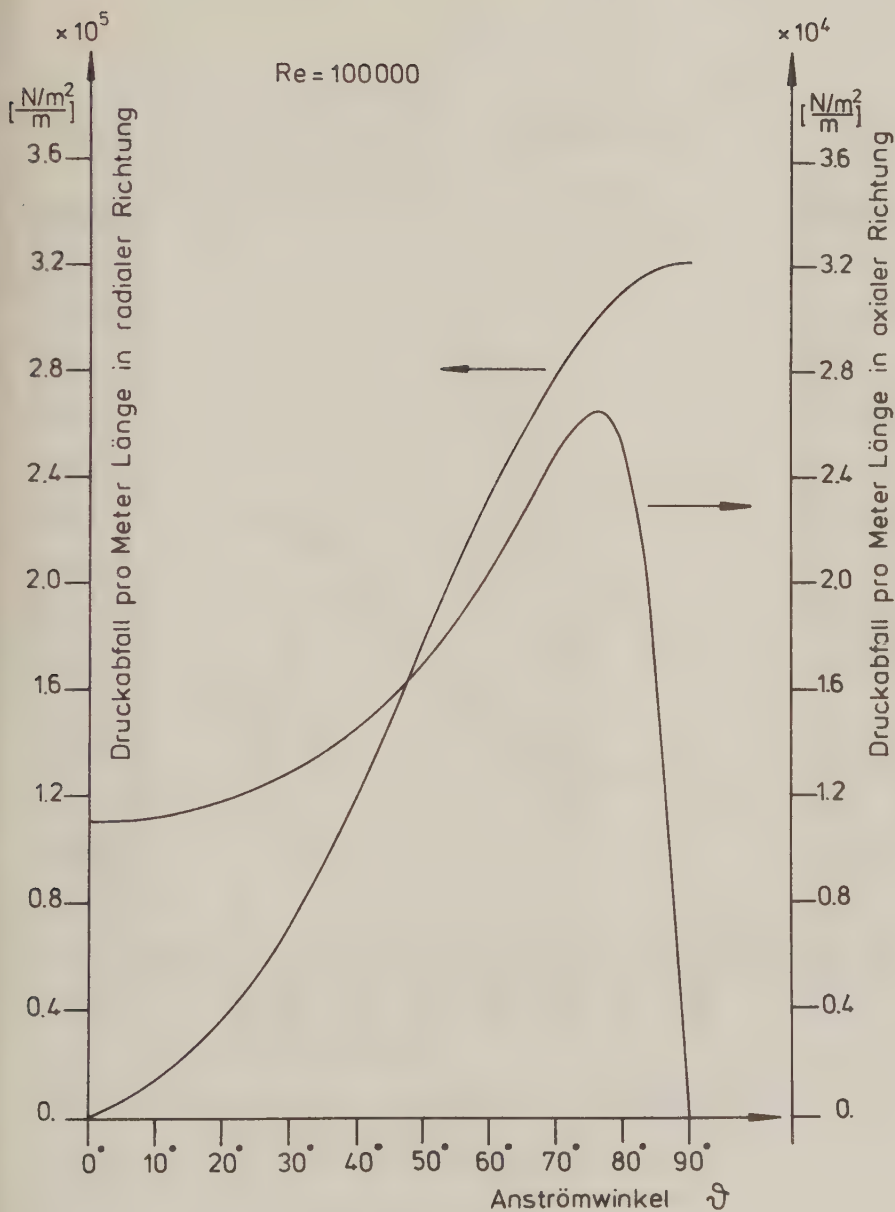


Bild 44b: Druckabfall pro Längeneinheit

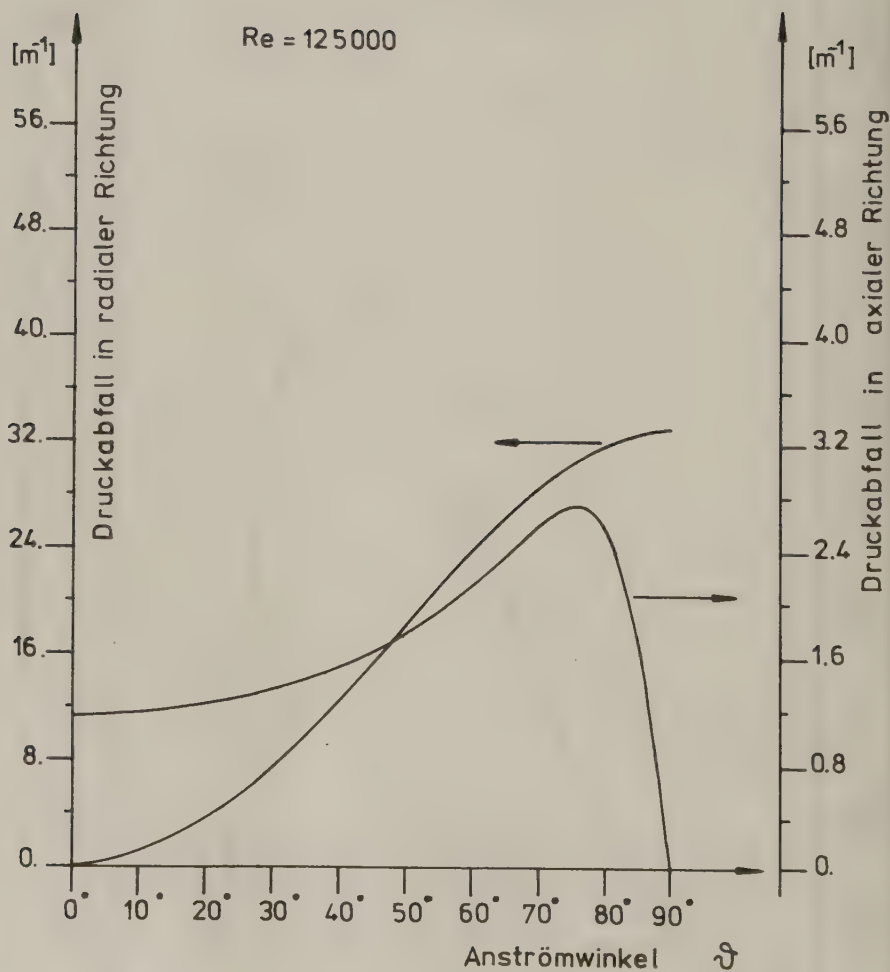


Bild 45a : Druckabfall bezogen auf den Staudruck

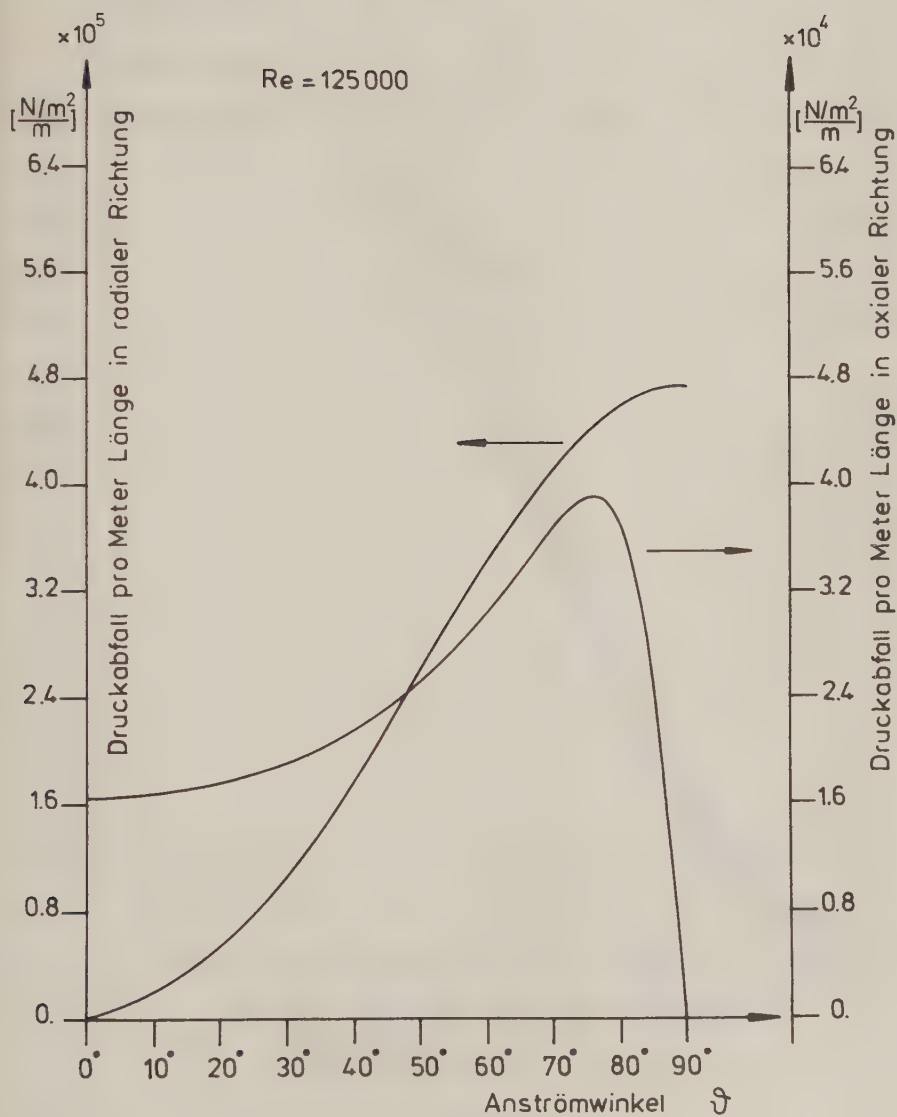


Bild 45b: Druckabfall pro Längeneinheit

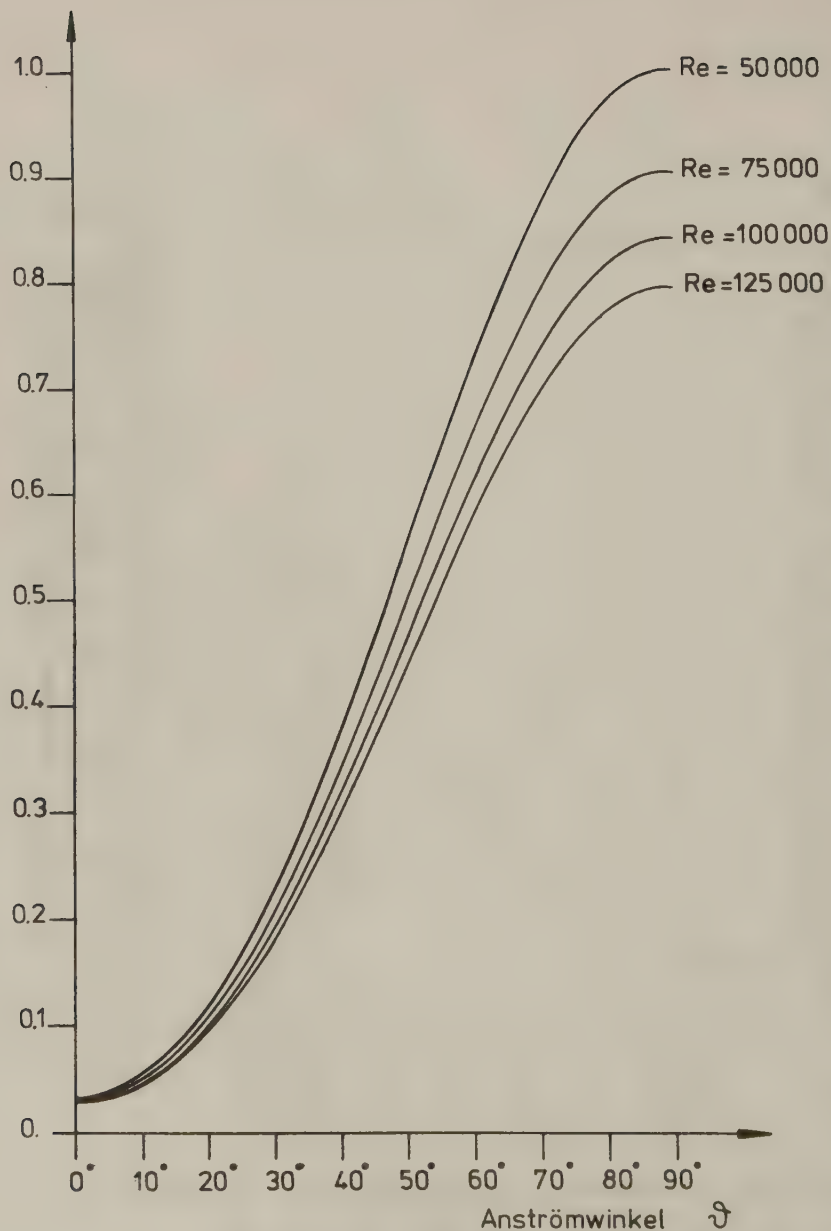
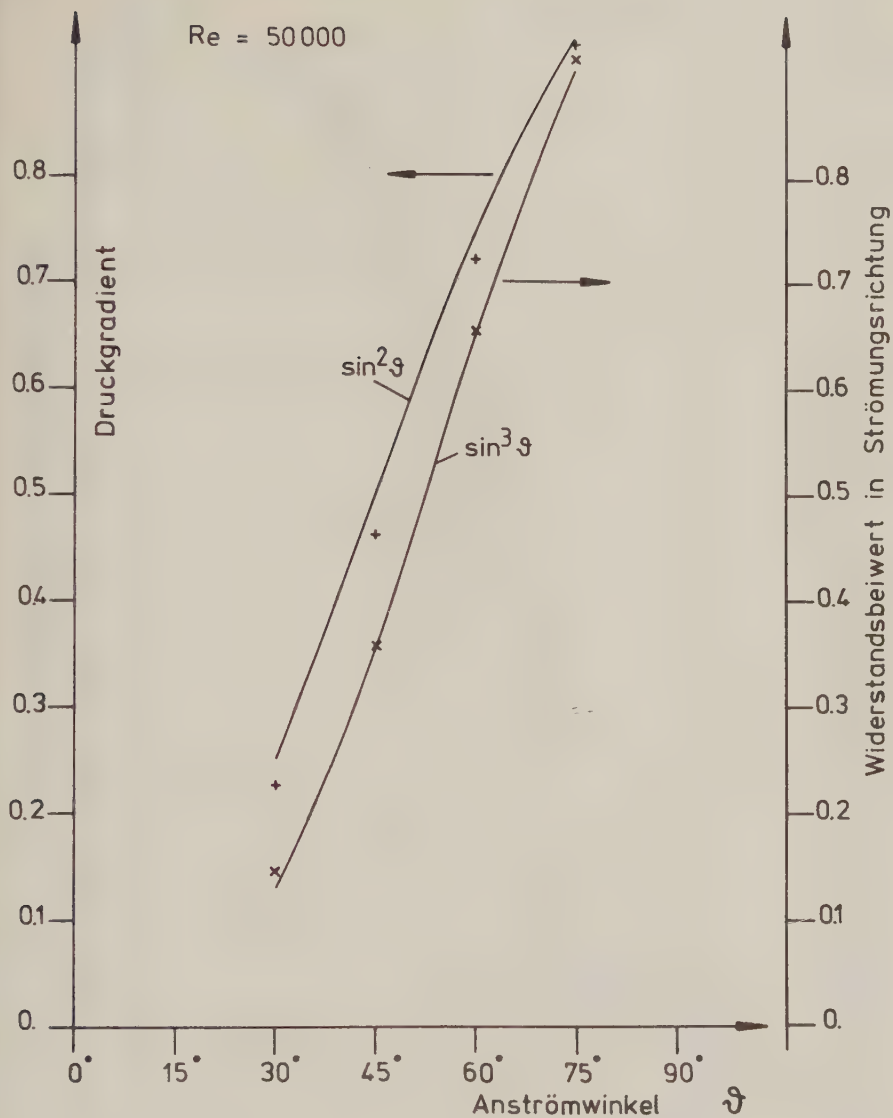


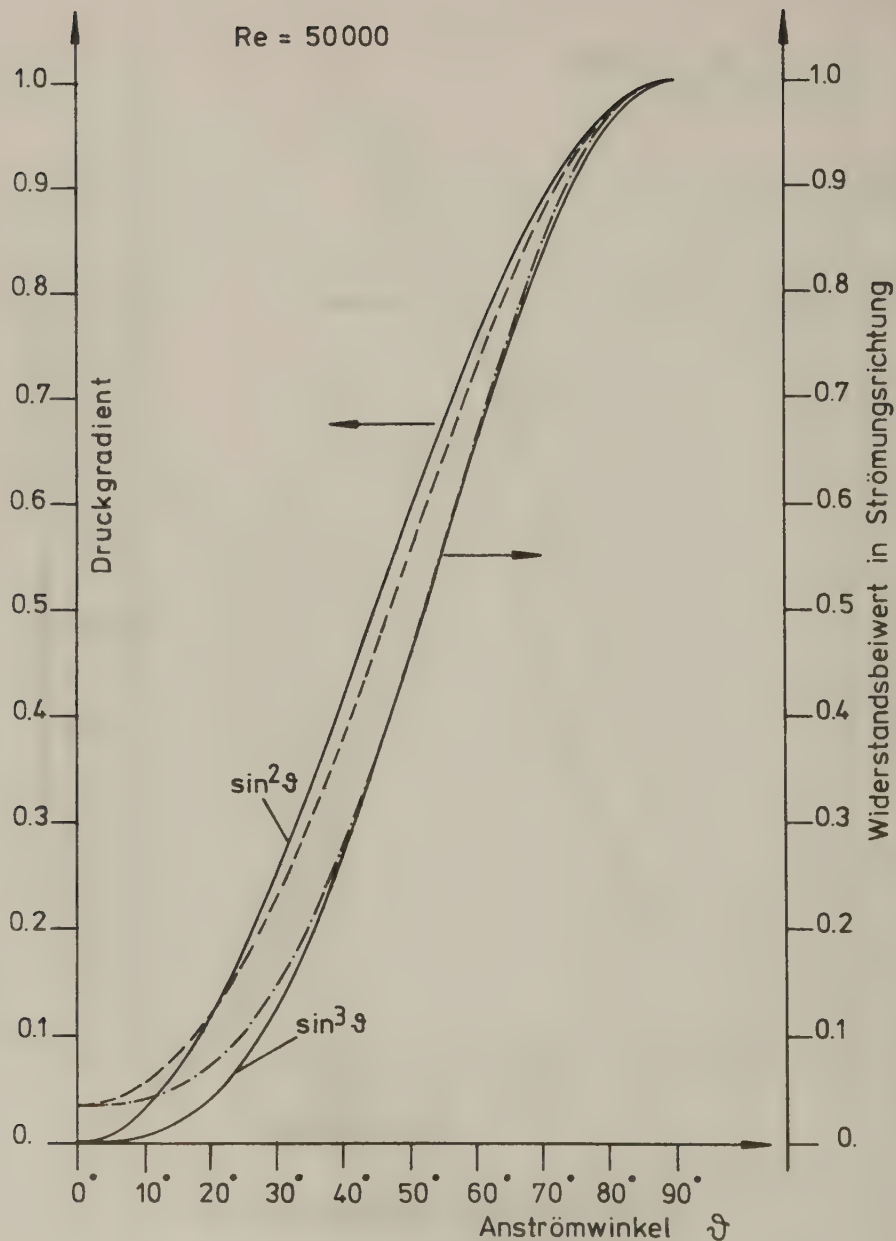
Bild 46 : Normierte Druckgradienten



- + Meßwerte des Druckgradienten
- x Meßwerte des Widerstandsbeiwertes

Bild 47: Normierter Widerstandsbeiwert im Vergleich zum Druckgradienten

Re = 50000



- Verlauf des Druckgradienten
- · - · - Verlauf des Widerstandsbeiwertes

Bild 48 : Normierter Druckgradient und Widerstandsbeiwert im gesamten Winkelbereich

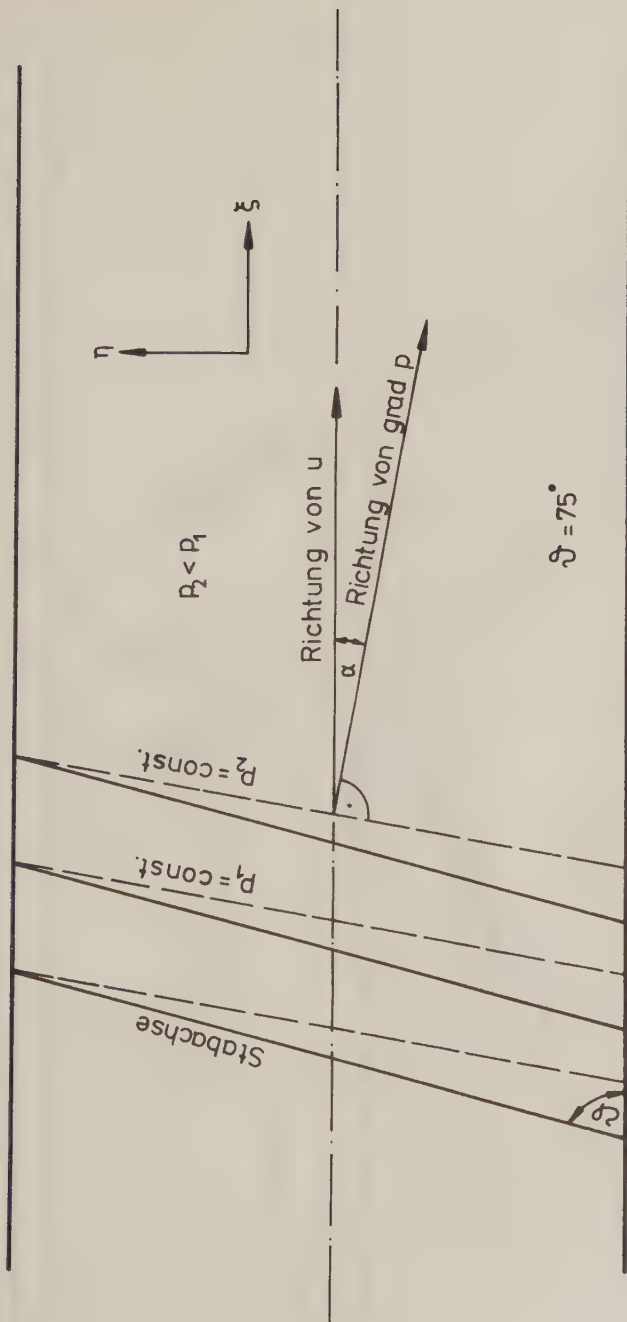


Bild 49 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung

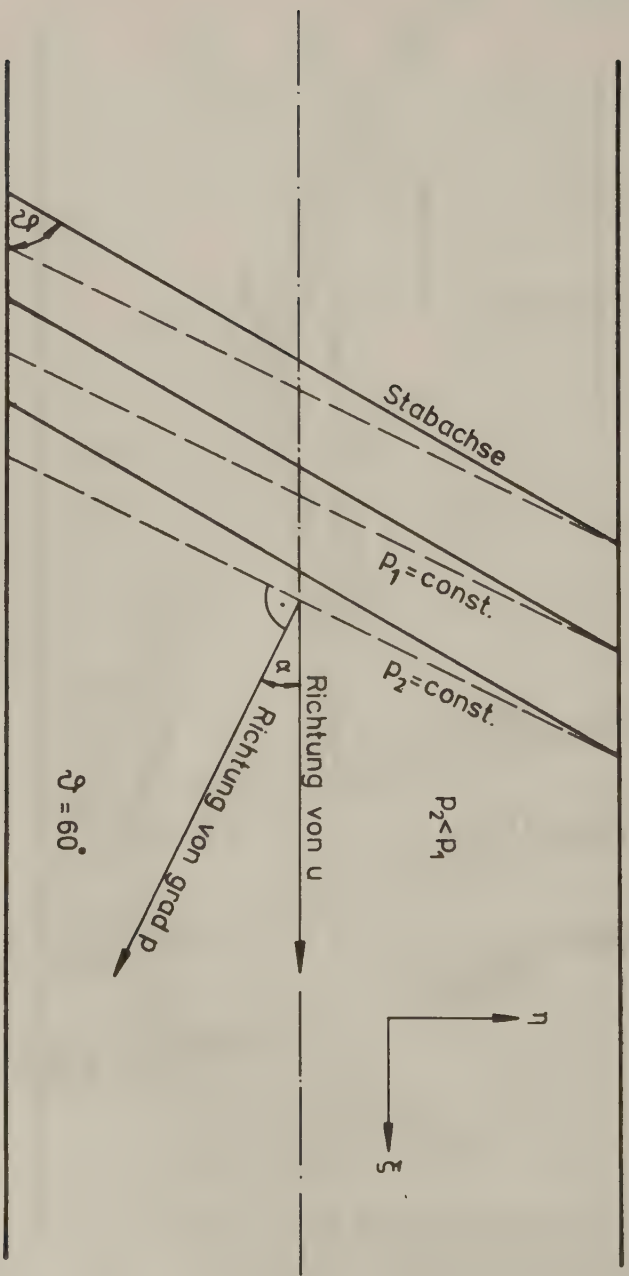


Bild 50 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung

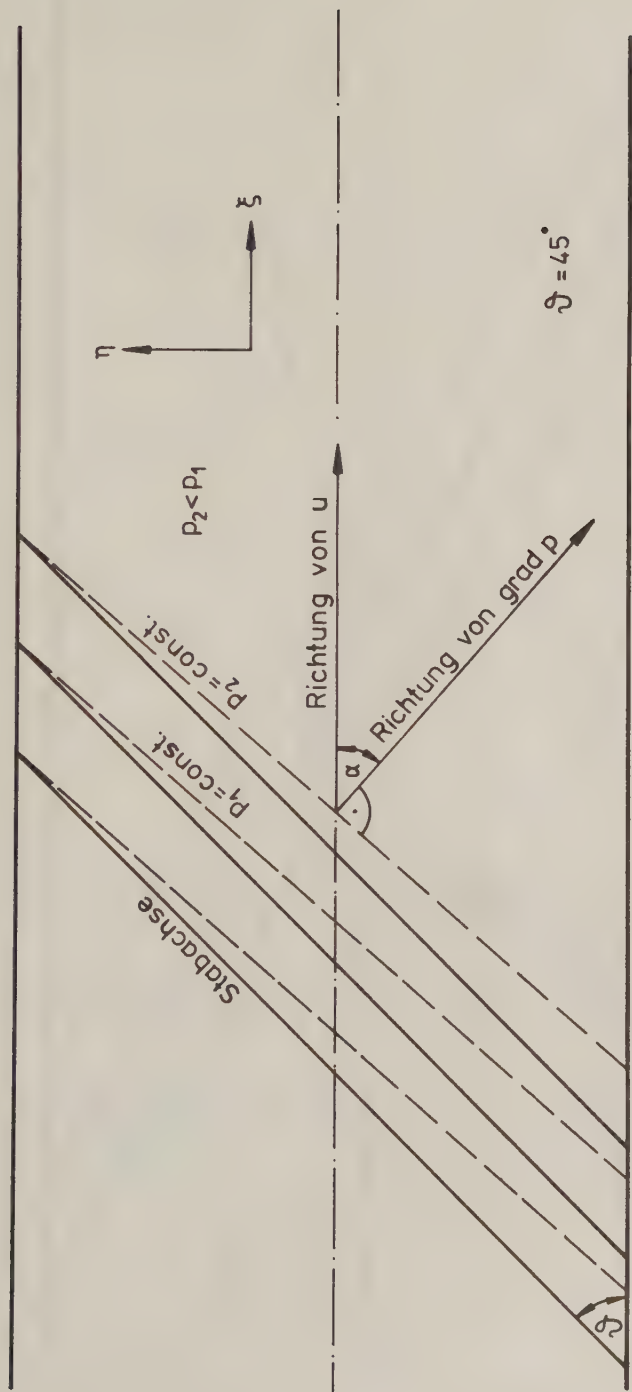


Bild 51 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung

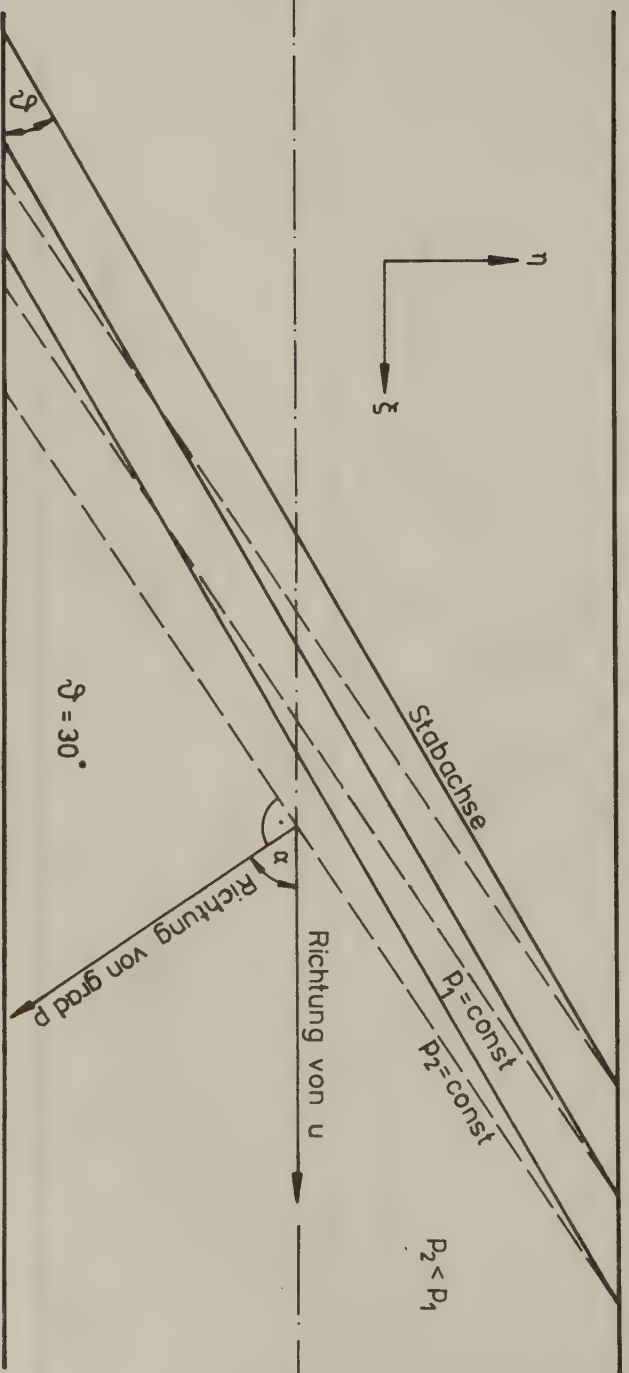


Bild 52 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung

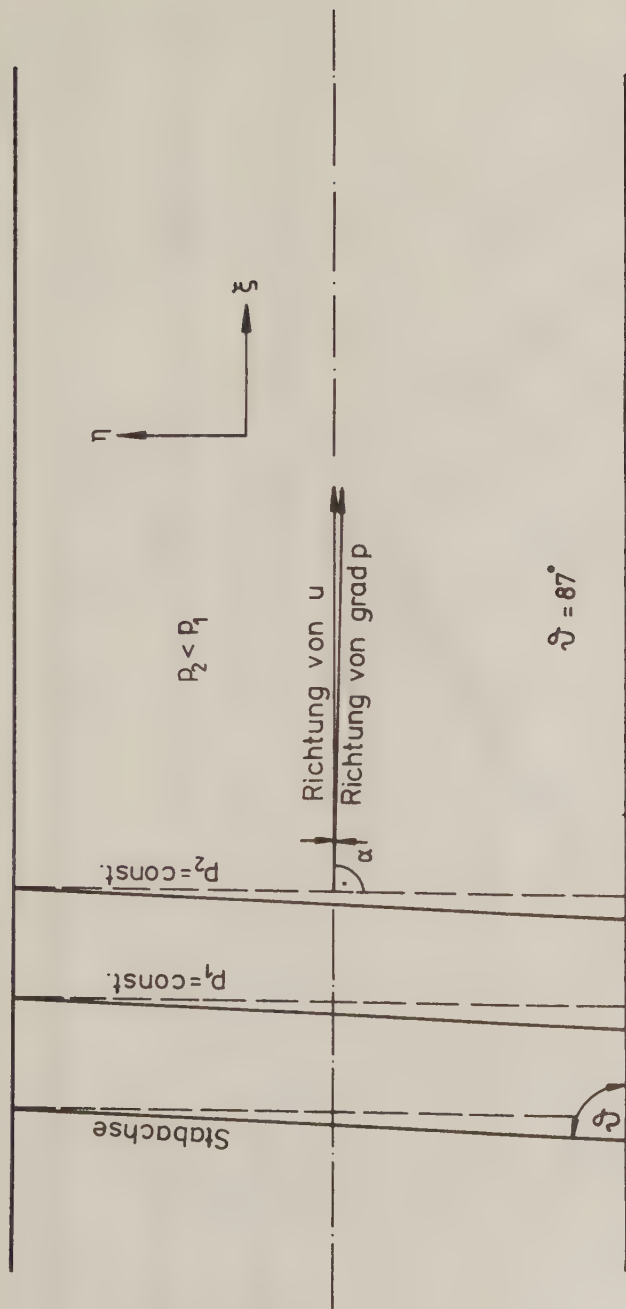


Bild 53 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung

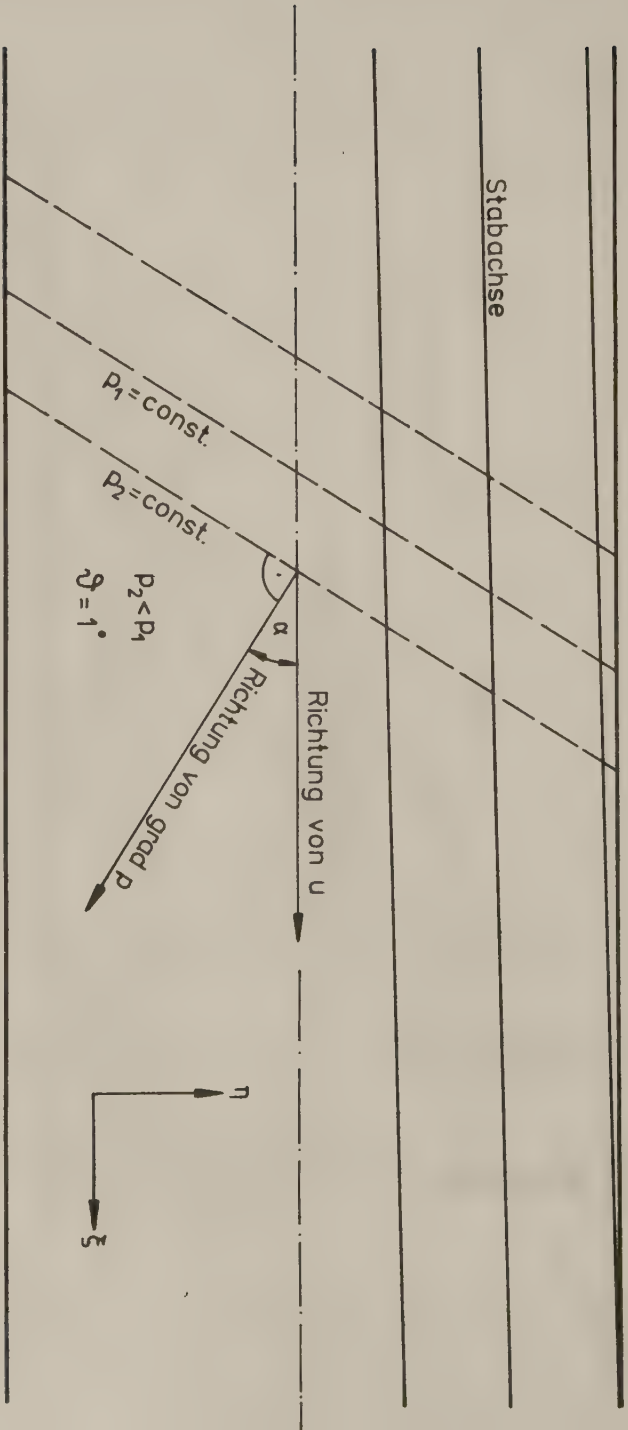
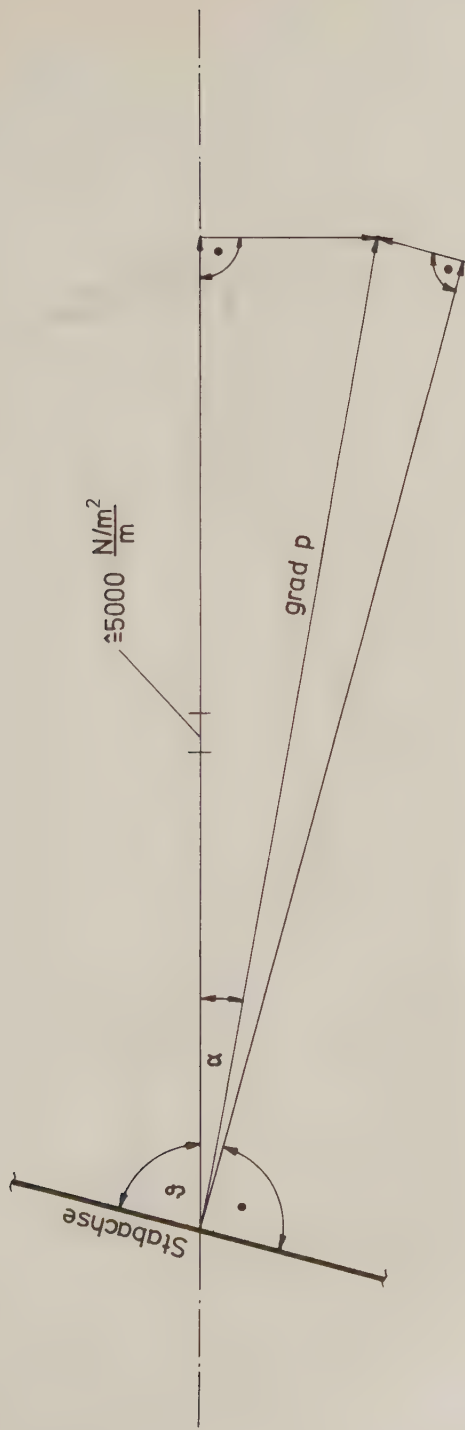
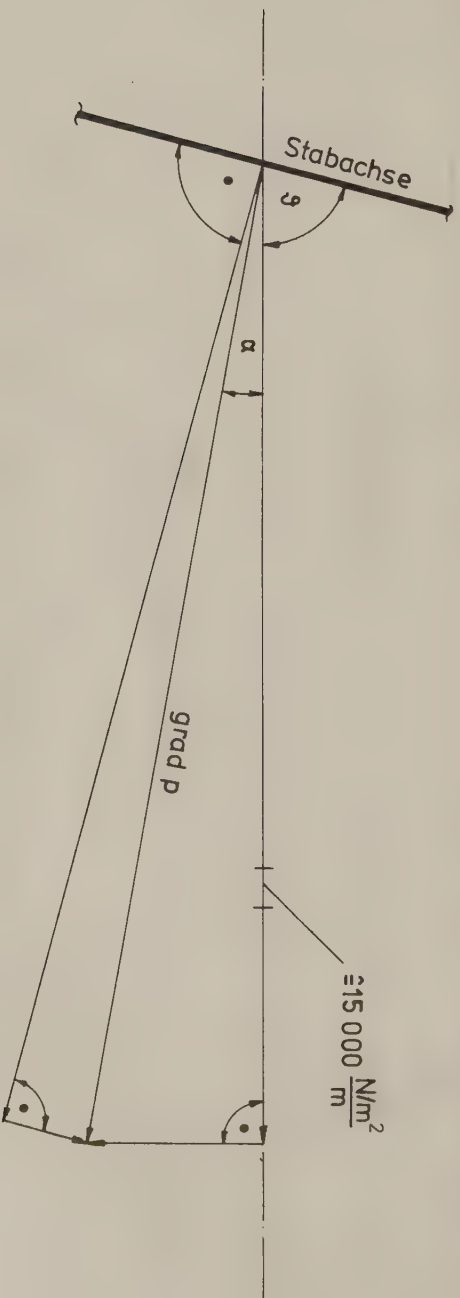


Bild 54 : Verlauf der Isobaren in einem Stabgitter mit Dreiecksanordnung



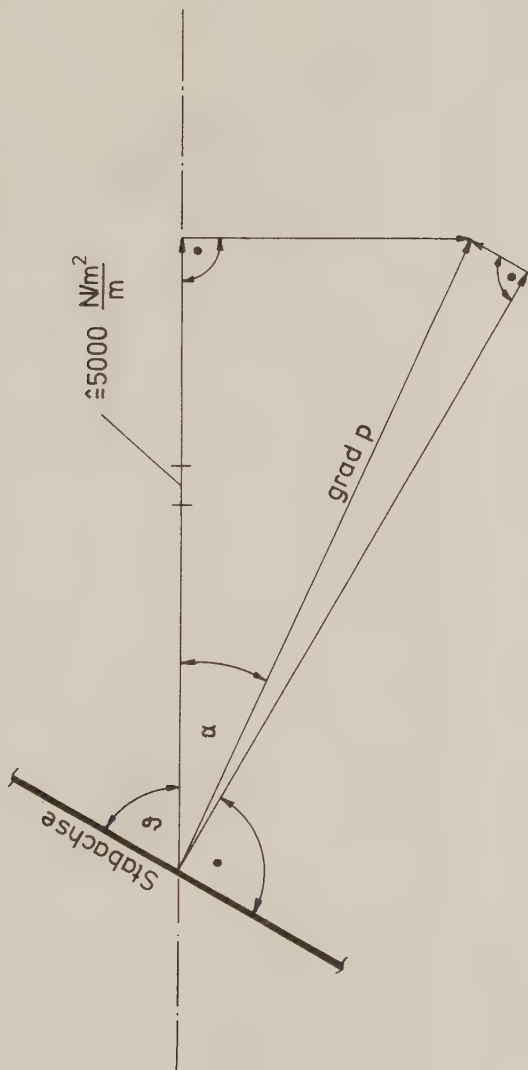
$\beta = 75^\circ$ $\text{Re} = 63000$

Bild 55 : Vektorielle Darstellung der gemessenen Druckgradienten



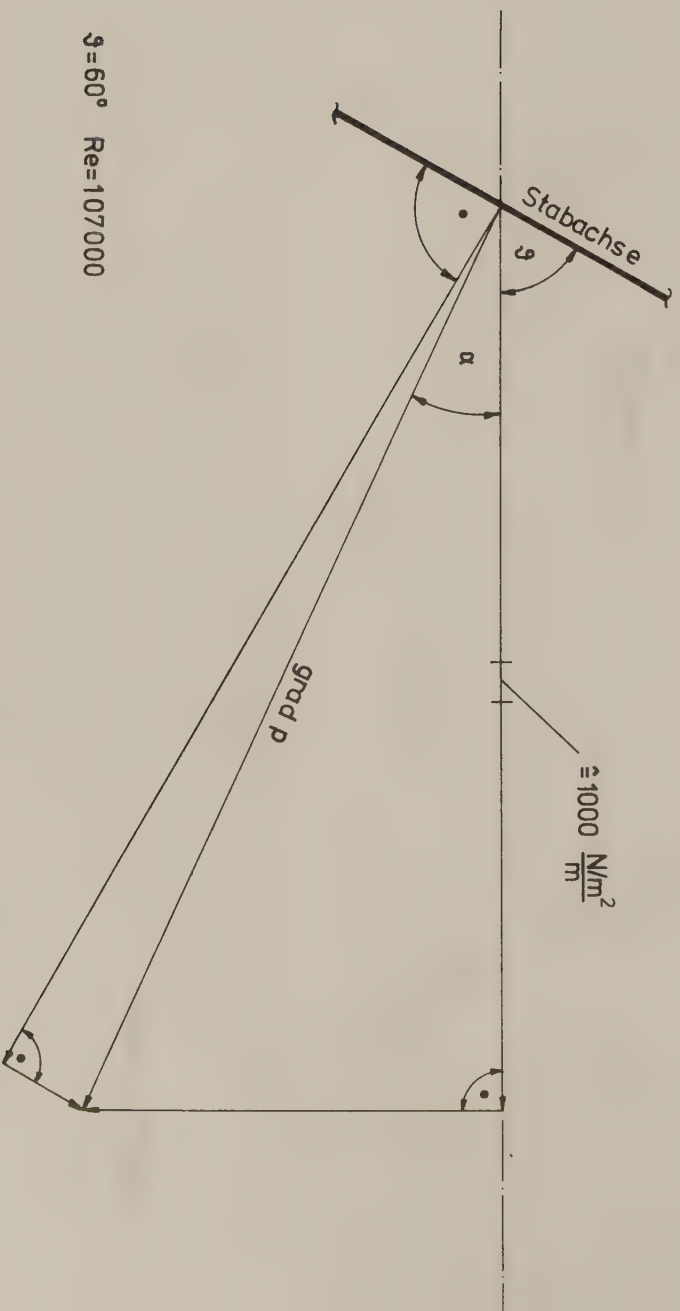
$$\beta = 75^\circ \quad Re = 115\,000$$

Bild 56: Vektorielle Darstellung der gemessenen Druckgradienten



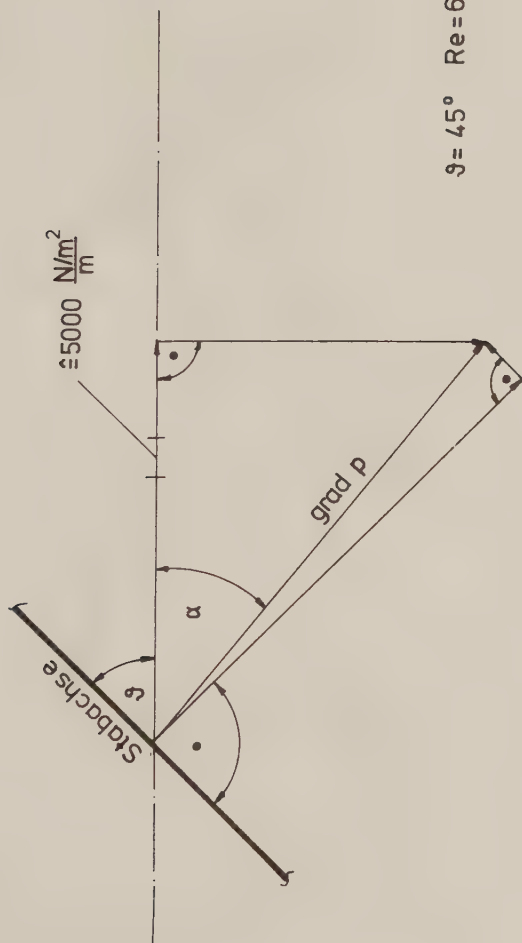
$\vartheta = 60^\circ$ Re = 61900

Bild 57 : Vektorielle Darstellung der gemessenen Druckgradienten



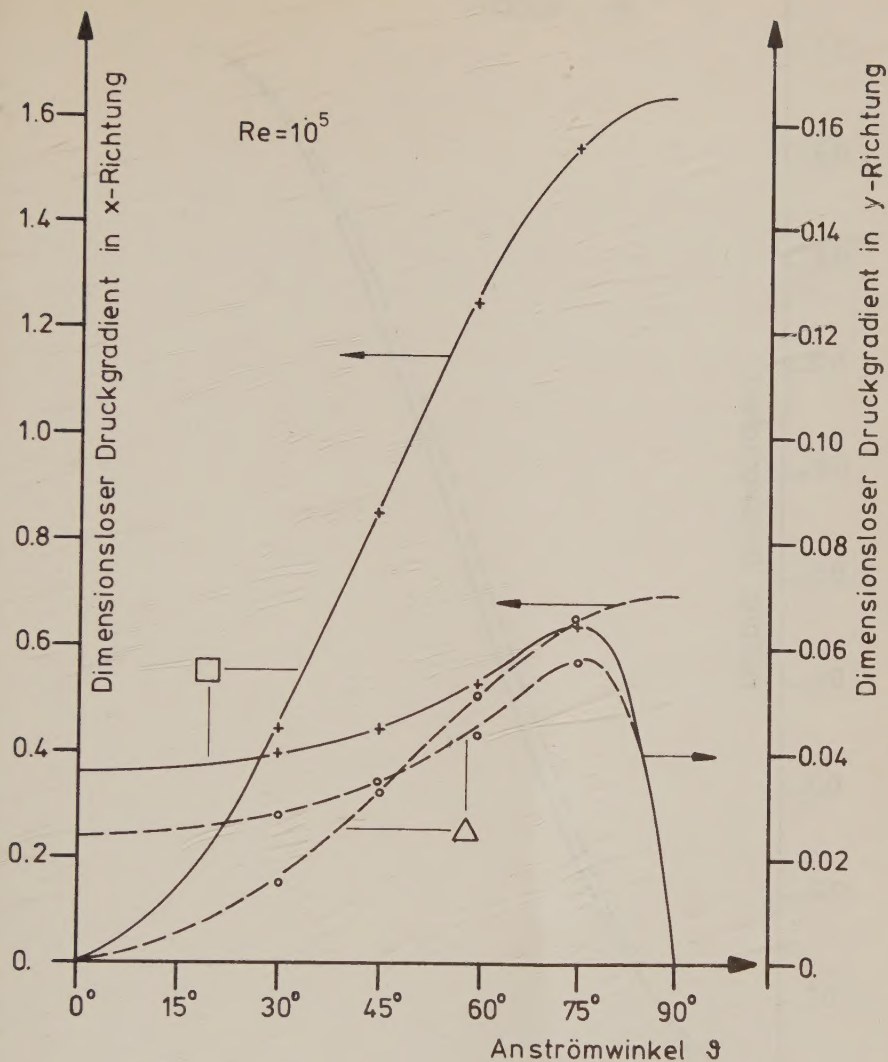
$$\beta = 60^\circ \quad Re = 107000$$

Bild 58: Vektorielle Darstellung der gemessenen Druckgradienten



$$\gamma = 45^\circ \quad \text{Re} = 66100$$

Bild 59 : Vektorielle Darstellung der gemessenen Druckgradienten



$$-\frac{2 \cdot d}{\rho \cdot u^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{u} \cdot [\underline{\xi} \cdot \vec{u}]_x$$

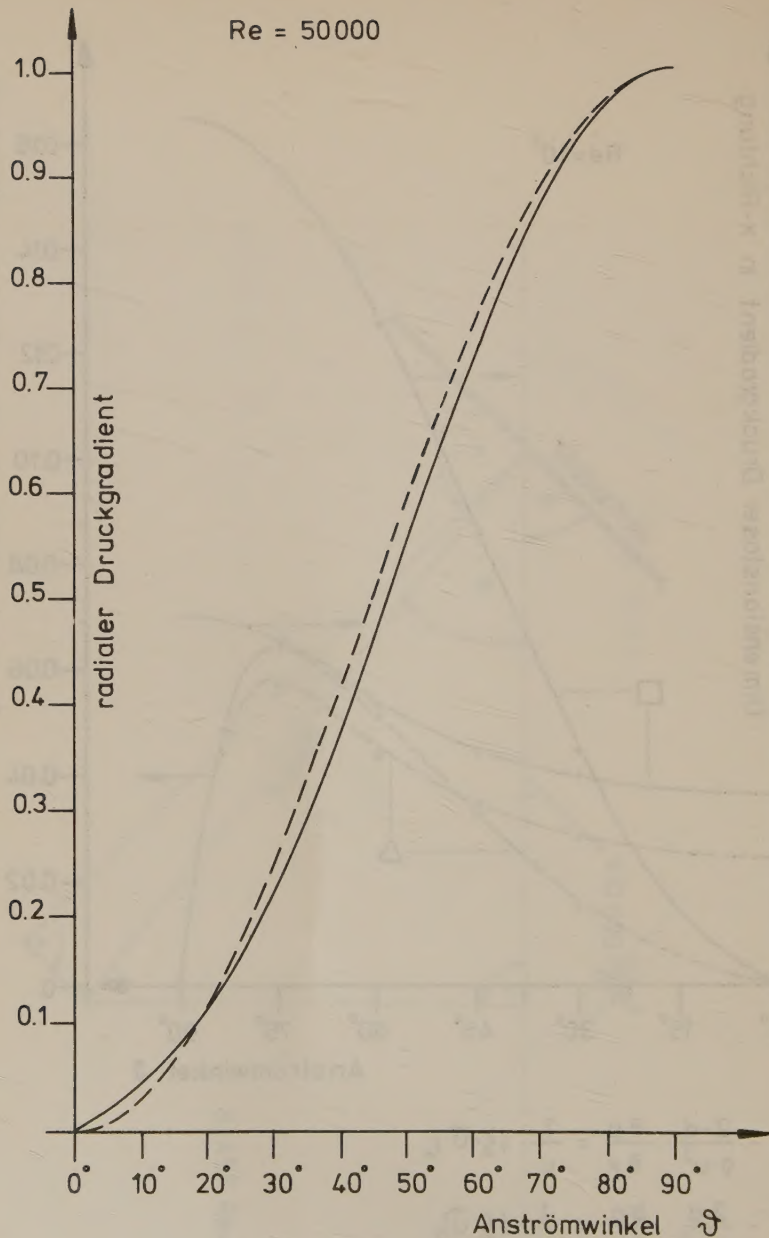
$$-\frac{2 \cdot d}{\rho \cdot u^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{u} \cdot [\underline{\xi} \cdot \vec{u}]_y$$

+ Meßwerte bei □-Anordnung

o Meßwerte bei Δ Anordnung

Bild 61 : Vergleich der Druckgradienten bei
Δ- und □-Anordnung

Re = 50000



$$--- \frac{|\Delta P|}{|\Delta x|} = \frac{\rho}{2} \zeta_x U_x^2 \sim \sin^2 \theta$$

Bild 62: Gegenüberstellung der normierten, radialen Druckgradienten und der Funktion $\sin^2 \theta$

